



Hodnocení odolnosti ochranného nástřiku kovové formy při nízkotlakém lití

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Jan Boubín

Vedoucí práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Jan Sirůček

RONAL CR s.r.o.





Zadání diplomové práce

Hodnocení odolnosti ochranného nástřiku kovové formy při nízkotlakém lití

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Boubín**
Osobní číslo: S17000392
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s technologií nízkotlakého lití slitin hliníku do kovových forem.
2. Prostudujte problematiku ošetření líce kovové formy ochranným nástřikem. Zaměřte se na přípravu povrchu před aplikací postřiku, na způsoby jeho nanášení a možnosti posouzení odolnosti nástřiku mechanickému poškození.
3. Navrhněte metodiku zkoušení a hodnocení odolnosti ochranného nástřiku líce formy mechanickému poškození během licího procesu.
4. V rámci spolupráce s firmou RONAL CR s.r.o. proveďte a vyhodnoťte experimenty zaměřené na hodnocení trvanlivosti ochranného nástřiku.
5. Na základě získaných výsledků formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

tabulky, grafy
cca 50
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [2] MICHNA, Š. et al. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd., Prešov 2005.
- [3] MACHUTA, J. a I. NOVÁ. *Slévárenské formy*. Liberec: TUL, 2014. ISBN 978-80-7494-083-5.
- [4] NOGOWIZIN, B. *Theorie und Praxis des Druckgusses*. Berlin: Schiele & Schön, 2011. ISBN 978-3-7949-0796-0.
- [5] RUŽBARSKÝ, J. a kol. *Techniques of die casting*. 1. vyd. Lüdenscheid: RAM-Verlag, 2014. ISBN 978-3-942303-29-3.
- [6] Časopisy: Slévárenství, Giesserei, atd.

Vedoucí práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Jan Sirůček
RONAL CR s.r.o.

Datum zadání práce:

31. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.


Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

11. června 2020



Bc. Jan Boubín

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá ochrannými postřiky líce kovové formy pro nízkotlaké lití a jejich hodnocením proti mechanickému opotřebení. Práce se skládá ze dvou hlavních částí, teoretické a experimentální. Teoretická část popisuje základní princip technologie nízkotlakého lití. Dále jsou zde popsány formy pro nízkotlaké lití, jejich konstrukce a životnost. Pozornost je věnována samotným ochranným postřikům, jejich technologii přípravy, životnosti a metodám hodnocení vlastností těchto postřiků. Experimentální část je zaměřena na zkoušení a hodnocení trvanlivosti ochranných postřiků. Tato část obsahuje návrh přípravku pro výrobu vzorků a popis procesu výroby vzorků. Následně je hodnoceno chemické složení jednotlivých postřiků, tloušťka postřiku a drsnost povrchu postřiku. Hlavní část kapitoly je věnována měření mechanického opotřebení vzorku za pomoci tribometru za pokojové teploty a při 400 °C. V závěru je navržena metodika použita k vyhodnocení nejodolnějšího ochranného postřiku.

Klíčová slova

Nízkotlakého lití, ochranný postřik forem, dělicí prostředek, tribologie

Annotation

This thesis deals with die coatings for low pressure die casting and their evaluation of mechanical wear. The thesis is divided into two parts, theoretical and experimental. Theoretical part describes fundamental principle of low pressure die casting technology. In further this thesis describes moulds for low pressure die casting, design of moulds and their lifetime. The thesis is focused on die coatings, technology of preparation, their lifetime and methods of their properties evaluation. The experimental part is focused on examination and evaluation die coatings durability. This part of thesis includes the design of jig for die coatings samples and the process of samples production. Afterwards the chemical composition of each die coating, the thickness and surface roughness is evaluated. The main part of this chapter deals with measuring of mechanical wear by tribology in conditions of room temperature and 400 °C. In the end of this chapter is suggested methodology used for evaluation of the most resistant die coating.

Key words

Low pressure die casting, die coating, separator, tribology

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za cenné rady a věnovaný čas při zpracování diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat pracovníkům Katedry materiálů a zejména Ing. Totce Bakalové, Ph.D. za odborné vedení a strávený čas při experimentální části diplomové práce. Dále děkuji panu Ing. Janu Sirůčkovi za konzultace a poskytnuté informace potřebné při zpracování této diplomové práce.

V neposlední řadě děkuji mé rodině, přítelkyni a blízkému kruhu přátel, kteří mě vždy motivovali a morálně podpořili.

Obsah

Seznam použitých zkratk	10
1. ÚVOD	11
2. TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1. Nízkotlaké lití	12
2.2. Zařízení pro nízkotlaké lití	15
2.3. Formy pro nízkotlaké lití	17
2.3.1 Konstrukce formy	19
2.4. Postřík nízkotlakých forem	25
2.4.1. Funkce postříků	27
2.4.2. Technologie postříku	29
2.4.3. Metody hodnocení vlastností povrchu separátoru	33
2.4.4. Životnost a vady postříků	37
2.5. Životnost formy	40
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
3.1. Příprava vzorků	44
3.2. Chemické složení ochranných postříků	47
3.3. Měření tloušťky ochranného postříku	49
3.4. Měření drsnosti povrchu ochranného postříku	51
3.5. Hodnocení odolnosti ochranného postříku mechanickým poškozením	53
3.5.1. Rotační tribologie	53
3.5.2. Vysokoteplotní rotační tribologie	59
3.5.3. Lineární tribologie	62

3.5.4. Vysokoteplotní lineární tribologie	66
4. DISKUZE VÝSLEDKU	69
5. Závěr	73
Použitá literatura	76
Přílohy.....	80

Seznam použitých zkratek

v	$[\text{m.s}^{-1}]$	rychlost plnění
p_1	$[\text{Pa}]$	tlak plynu působící na hladinu taveniny v kelímku udržovací pece
p_2	$[\text{Pa}]$	tlak nad hladinou taveniny ve stoupací trubici
H	$[\text{m}]$	výšku taveniny ve stoupací trubici nad úrovní hladiny v peci
ρ	$[\text{kg.m}^{-3}]$	hustotu odlévané slitiny
g	$[\text{m.s}^{-2}]$	gravitační zrychlení
μ_h	$[-]$	součinitel hydraulických ztrát
μ	$[-]$	koefficient tření
F	$[\text{N}]$	třecí síla
N	$[\text{N}]$	přítlačná síla
R_a	$[\mu\text{m}]$	střední aritmetická úchylka profilu
S_z	$[\mu\text{m}]$	plošná drsnost povrchu – výška mezi nejnižší prohlubní a nejvyšším výstupkem
V_{pin}	$[\text{mm}^3]$	objem opotřebení kuličky
A	$[\text{mm}]$	průměr kuličky uprostřed opotřebené plochy
B	$[\text{mm}]$	průměr kuličky kolmý na rozměr A
D	$[\text{mm}]$	průměr kuličky
T	$[\text{°C}]$	teplota
REF		referenční vzorek
HV		tvrdost podle Vickerse
RTG		rentgen
TIG		tungsten inert gas

1. ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá problematikou nízkotlakého lití. Pozornost je soustředěna na problematiku ošetření lící kovové formy ochranným postřikem, přípravy povrchu před nanášením, technologie nanášení a na možnosti hodnocení odolnosti postřiku.

Separční postřik je pro nízkotlaké lití do kovových forem velmi důležitým činitelem, který ovlivňuje povrchovou a také vnitřní kvalitu odlévaných dílů. Volba vhodného postřiku a metody jeho nanášení je přinejmenším stejně důležitá jako ostatní faktory procesu nízkotlakého lití.

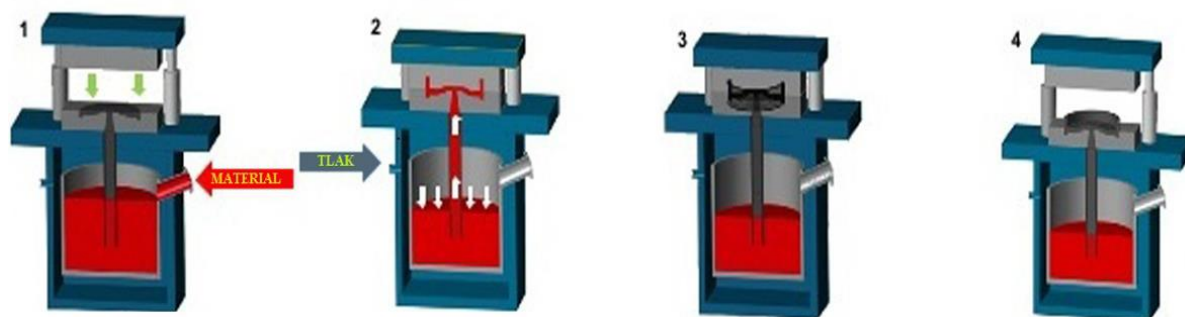
Technologie nízkotlakého lití (Low Pressure Die Casting, Nieder-Druck Guss Giesseverfahren) se začala používat ve třicátých letech 20. století. První zařízení byla použita pro odlévání kol z oceli pro lokomotivy a vagóny. V polovině padesátých let se v Československu stal propagátorem této technologie Josef Lát senior, který se inspiroval ve Velké Británii a postavil vlastní zařízení. V letech šedesátých bylo založeno vývojové středisko pro rozvoj a rozšíření této metody v tehdejší Československu v podniku Metaz, Týnec nad Sázavou. Kvalitativně zcela nová etapa využití metody nízkotlakého lití nastala v době, kdy přední světové firmy rozhodly o výrobě automobilových kol ze slitin hliníku. [1, 15]. V dnešní době se technologií nízkotlakého lití vyrábí odlitky vysoké vnitřní kvality z lehkých slitin, převážně hliníku a hořčíku. Bývají to odlitky o hmotnosti až 150 kilogramů a tloušťce stěny 8 až 30 mm. Jejich aplikaci hledejme převážně v automobilovém průmyslu v podobě bloků motorů, hlav válců nebo odlitků kol. S produkty nízkotlakého lití je možné se setkat i mimo automotive v elektroinženýrství nebo ve vesmírném průmyslu.

Cílem diplomové práce je navrhnout metodiku zkoušení a hodnocení odolnosti ochranného postřiku lící formy mechanickému poškození během procesu nízkotlakého lití. Vzhledem k velikosti jednotlivých částí forem by bylo poněkud problematické hodnotit mechanické poškození ochranného postřiku přímo na formě. Proto bude v rámci spolupráce s firmou RONAL CR s.r.o. navržena metodika zkoušení a hodnocení pomocí zkušebních vzorků. Ve snaze o co největší přiblížení reálným podmínkám budou materiál, příprava povrchu vzorku a podmínky aplikace ochranného postřiku provedeny ve shodě s podmínkami průmyslové výroby.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Nízkotlaké lití

Metodu nízkotlakého lití lze svým principem zařadit mezi gravitační lití do trvalých forem a vysokotlaké lití. Převážně se odlévá do kovových forem, nicméně v zahraničí se v menším množství objevují i formy pískové. V současnosti se jedná o průmyslově využívanou metodu, kterou se odlévají většinou odlitky z lehkých slitin, převážně ze slitin hliníku a hořčíku. Jsou to především odlitky rotačních tvarů, symetrické kolem osy rotace, jejichž tloušťka stěny odlitku se pohybuje od 8 do 30 mm a hmotnost odlitků se běžně pohybuje mezi 2 – 150 kilogramy. Metoda zaručuje vysokou vnitřní kvalitu odlitku s vysokým využitím tekutého kovu. [1, 2]



Obr.2.1: Schéma výroby odlitku nízkotlakým litím [5]

Princip metody nízkotlakého lití, který je patrný z obr. 2.1, spočívá v působení tlaku vzduchu (případně inertního plynu) na hladinu taveniny v udržovací peci, která musí být hermeticky uzavřena. Samotná tavba vsázkového materiálu probíhá v tavících pecích a z nich je v transportních pánvích rozvážena do udržovacích pecí licích strojů. Tavenina v kelímku udržovací pece je se spodním dílem formy propojena stoupací trubicí ze žáruvzdorného materiálu tak, že trubice spodním okrajem zasahuje pod hladinu kovu. To také znamená, že je trubice ponořena pod vrstvu oxidů a do formy vstupuje tavenina takřka bez oxidů. Během pracovního cyklu se odléváný kov dostane do styku s okolní atmosférou pouze malou kontaktní plochou (průřez stoupací trubice) a tak nedochází k nadměrné tvorbě oxidů. Vlivem

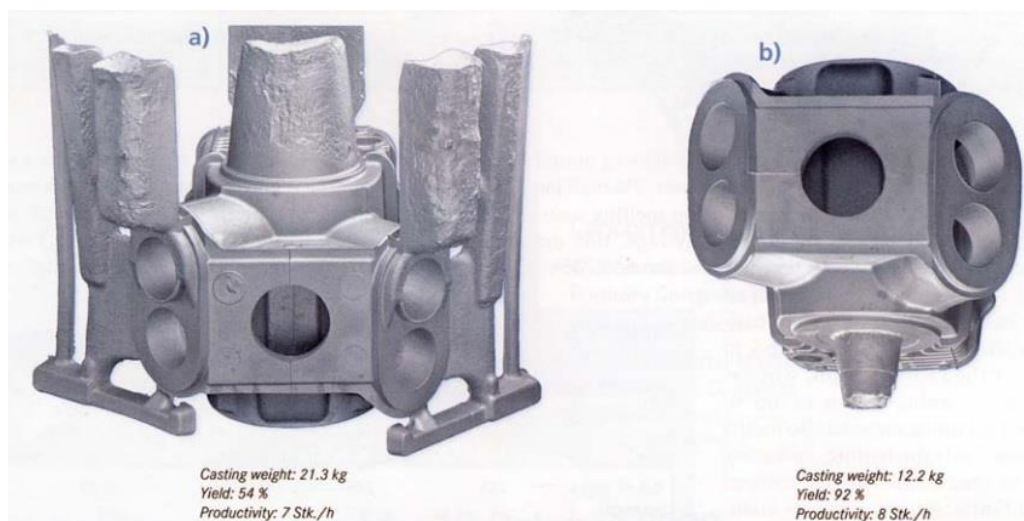
přetlaku vzduchu 30 – 50 kPa začne tavenina stoupací trubicí postupně stoupat až do nejvyšší úrovně dutiny formy. Stoupací trubice je také vhodným místem pro zařazení například pěnových filtrů. Rychlost plnění lze ovládat změnou tlaku vzduchu. V kombinaci s vhodnou geometrií formy je plnění velmi klidné, bez turbulencí a vírů. Před vstupem taveniny do formy je nutné formu předeřhřát na pracovní teplotu 250 - 400°C. S ohledem na agresivní chemické reakce odlévaného kovu se základním materiálem formy bývají její funkční plochy opatřeny ochranným postříkem, kterému je věnována větší pozornost v kapitole 2.4. Při zcela zaplněné dutině formy lze zvýšit tlak v průběhu tuhnutí odlitku a provést tak tzv. dotlak, který může pozitivně ovlivnit konečnou hustotu odlitku, pozitivně působit na snížení mikroporovitosti odlitku, a tím ke zvýšení vnitřní kvality odlitku. Dotlak je možné uvolnit, pokud kov zatuhl i v ústí plnicí trubice. Zbylý tekutý kov se vrací zpět do udržovací pece. Když je ukončeno tuhnutí a chlazení odlitku, forma je otevřena a odlitek zůstává zachycen v horní části formy. [1, 2,]

Celý proces nízkotlakého lití je možné do velké části automatizovat a není výjimkou, že jeden operátor obsluhuje více nízkotlakých licích strojů. Čas výrobního cyklu pro jeden odlitek závisí na velikosti odlitku, nicméně pohybuje se v podobných hodnotách jako u gravitačního lití. Např. u takového průměrného odlitku kola se čas cyklu pohybuje v rozmezí 5 - 6 minut. Při lití silnostěnných odlitků s dlouhou dobou tuhnutí se však velmi prodlužuje délka výrobního cyklu. [2, 3]

Aplikace nízkotlakých odlitků se nachází ve velké míře v automobilovém průmyslu. Odlévají se kola, části motorů a převodovek nebo podvozkové díly. Dále je možné se s nízkotlakými odlitky setkat v podobě těl elektromotorů nebo kompresorů, v kuchyni ve formě tlakových hrnců nebo v high-tech vesmírném inženýrství. [1, 2]

Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly, mezi nesporné výhody nízkotlakého lití bezpochyby patří vysoké využití tekutého kovu v odlitku (90-95%). Surové odlitky mají jen malé zbytky po plnění plnicí trubicí, která zároveň u nízkotlakého lití přebírá funkci vtokové soustavy i nálitku. Nálitky se u nízkotlakých odlitků objevují jen zřídka; výjimku tvoří případy, kde jsou v horní části odlitku umístěny masivní partie odlitku – ty jsou pak nálitkovány. Ukázka srovnání identických odlitků vyrobených metodami gravitačního a nízkotlakého odlitku je uvedena na obr. 2.2. Obr. 2.2a odkazuje na nízké využití tekutého

kovu pro samotný odlitek při gravitačního lití, pouhých 54%. Oproti tomu má nízkotlaký odlitek bez nálitků a vtokového systému vysoké využití tekutého kovu 92%, viz obr. 2.2b. [1, 2]



Obr 2.2: Srovnání technologie výroby odlitku z Al-slitiny – těleso kompresoru:

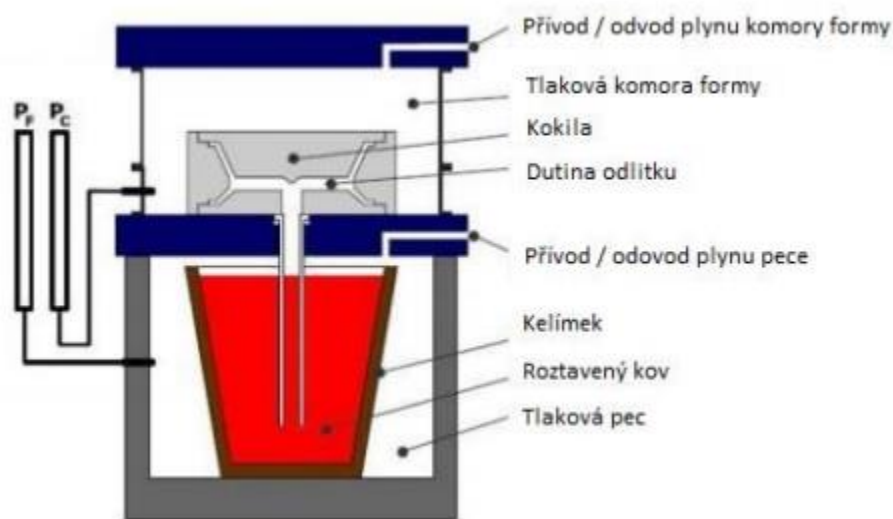
a) gravitační lití b) nízkotlaké lití [15]

Princip nízkotlakého lití umožňuje a podporuje kladně usměrněný průběh tuhnutí. To znamená, že odlitek tuhne odshora směrem dolů, tj. tloušťka stěn odlitku se odshora směrem k plnicí trubici musí zmenšovat, a tuhnutí musí být ukončeno v ústí plnicí trubice. Dochází tedy k usměrněnému tuhnutí zcela opačným směrem, než je tomu u tuhnutí při gravitačním lití. Kvalita odlitků vyrobených touto metodou je velmi vysoká. V odlitcích je minimum vměstků i plynových dutin a vyznačují se proto vynikající těsností vůči tlakovým mediím. [1, 2,]

Stroje pro nízkotlaké lití také vynikají ve své prostorové nenáročnosti. Díky vertikálnímu způsobu lití je možné na ploše, která je potřebná pro umístění jednoho vysokotlakého stroje, umístit až dva stroje pro nízkotlaké lití. Lící stroj je cenově dostupnější než zařízení pro vysokotlaké lití. [3]

Mezi stinné stránky nízkotlakého lití patří například minimální tloušťka stěn 3 mm nebo délka celého lícího procesu, která je delší než u procesu vysokotlakého lití. [1, 2]

Variantou nízkotlakého lití je metoda lití s protitlakem. Jak je vidět z obr. 2.3, jedná se o úpravu metody, kde zpočátku působí přetlak plynů i na straně formy a odlití se dosahuje snížením tlaku ve formě. Díky působení vyššího tlaku v systému než u nízkotlakého lití dochází k rychlejšímu odvodu tepla (vyšší součinitel přestupu tepla), značně se eliminuje smrštění a snižuje se pórovitost odlitku a vznik ředin. Tato technologie se zvláště využívá pro odlitky s větší tloušťkou stěn. [2]



Obr 2.3: Schéma lícího stroje pro lití s protitlakem [4]

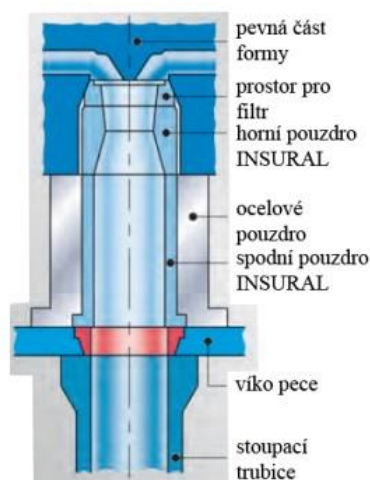
2.2. Zařízení pro nízkotlaké lití

Celá koncepce konstrukce nízkotlakého lícího zařízení je volena tak, aby vyhovovala vertikálnímu způsobu lití.

Ve spodní části zařízení se nachází **udržovací pec**, ve které je umístěn kelímek s roztaveným kovem. Jako udržovací pece se povětšinou používají malé pece nístějového typu s velmi účinnou izolací. Metalurgicky zpracovaná tavenina je k nim (čistá, odplyněná, modifikovaná a očkovaná) dopravena v rozvozovém kelímku pomocí vysoko zdvižného vozíku (jeřábu) a lije se přímo do nalévacího otvoru udržovací pece. Objem udržovací pece musí korespondovat s velikostí odlitků tak, aby intervaly mezi doplňováním kovu z tavící pece nebyly příliš krátké a nedocházelo tak k destabilizaci tepelného pole udržovací pece. Pec bývá povětšinou pevná, avšak musí umožnit naplnění připravenou taveninou, zajistit hermetické

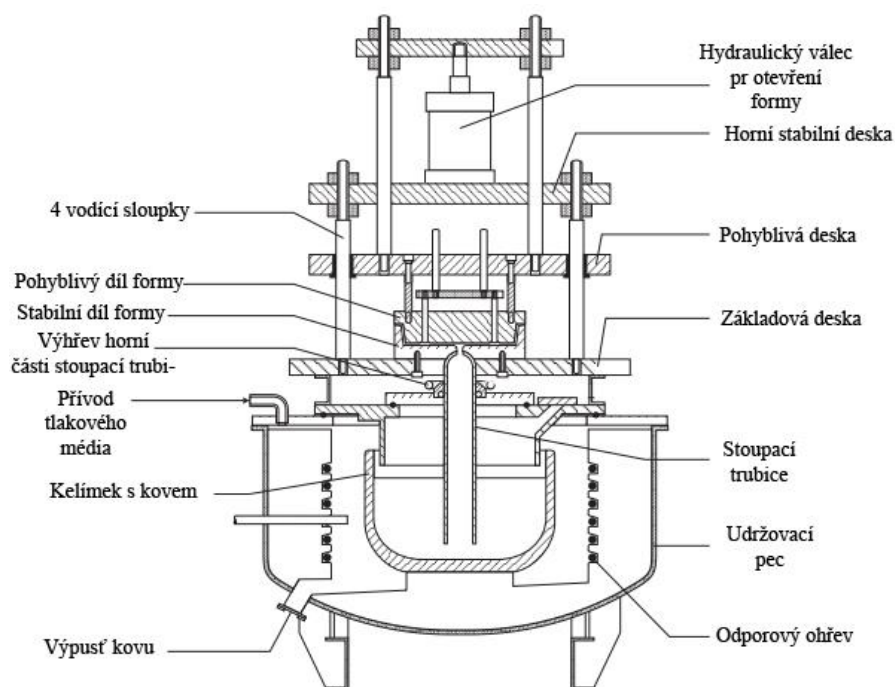
uzavření pracovního prostoru a udržovat konstantní teplotu taveniny. Tavenina se na programově stanovené teplotě udržuje odporovým teplem tzv. silitových tyčí (na bázi SiC). Tyto tyče jsou navíc chráněny ocelovými nebo keramickými trubicemi proti případnému mechanickému poškození. Teplotu je možné kontrolovat pomocí zabudovaných termočlánků. Zpravidla z důvodů minimalizace tepelných ztrát je celá konstrukce pro montáž a pohyb kovové formy umístěna přímo nad udržovací pecí. [1, 2, 3]

Pro dopravu taveniny mezi udržovací pecí a formou slouží *stoupací trubice*. Ta se v současné době vyrábí z grafitu, nebo z keramických materiálů (korund). Požadavkem na plnicí trubici je její dlouhá životnost, nepropustnost pro používané tlaky a média a minimální interakce s taveninou v udržovací peci. K zajištění vysoké povrchové a vnitřní kvality odlitků se do zaústění plnicí trubice do formy umísťuje kovové sítko s ocelovou vlnou. To je však nutno odříznout ze surového odlitku a separovat ho ostatního vratu. Pokud by ocelová sítko zůstala součástí vratu, zvyšovalo by se riziko vyššího obsahu železa v tavenině. V horní části bývá trubice vyhřívána, aby nedocházelo k jejímu ochlazování od chladicího systému spodní části formy. Vyhřívání lze také nahradit aplikací INSURAL, což jsou pouzdra z vysoce žáruvzdorného materiálu. Uspořádání stoupací trubice a aplikaci INSURAL je možné vidět na obr. 2.4. Výhodou žáruvzdorných pouzder je eliminace tepla od stoupací trubice nebo zkrácení lícího cyklu, což vede k zvýšení produktivity. [1, 2, 7]



Obr 2.4: Zástavba plnicí trubice s aplikací žáruvzdorných pouzder INSURAL [7]

Zaústění plnicí trubice vede do spodní (pevné) části formy. Horní (pohyblivý) díl formy s vyhazovači se pohybuje po dráze určené vodícími sloupky. Některé části formy se pohybují za pomoci hydraulických tahačů, jejichž pohyb je veden v základové desce. Detailní popis stroje je možné vidět na obr. 2.5. [3]



Obr 2.5: Schéma licího stroje pro nízkotlaké lití [3]

2.3. Formy pro nízkotlaké lití

Formy pro nízkotlaké lití se vyznačují zejména svou specifickou konstrukcí, která se odvíjí od horizontální dělící roviny. Tomu také odpovídá orientace odlitku ve formě. Do horní (pohyblivé) části formy je umísťována členitá část odlitku. Vzhledem k tomu, že při nízkotlakém lití odlitky tuhnou od nejvyšších míst dutiny směrem ke vtoku a vtokové trubici, která tak přebírá funkci nálitku, hrozí v horní části odlitku nebezpečí výskytu vyplavených nečistot. Proto se základní plochy, které se budou následně obrábět, umísťují do spodní (pevné) části formy. Nízkotlakou formu lze rozdělit na pevné a pohyblivé části tvořící dutinu formy. Spodní díl je pevný, ostatní díly jsou pohyblivé. [6]

Během provozu jsou formy velice namáhány jak od cyklických tepelných nárazů, tak i od erozivního proudu roztaveného kovu. Především je třeba volit materiál s malým koeficientem tepelné roztažnosti, protože tím se snižuje velikost vznikajících napětí a tím i životnost kovové formy. Rovněž tepelná vodivost materiálu formy má nemalý vliv. Vyšší součinitel tepelné vodivosti znamená nižší tepelně-mechanické namáhání. Nesmíme opomenout ani důležitost dobré obrobitelnosti formy. Proto se v průmyslové praxi pro tvarové vložky, kde se po odlití ještě počítá s obráběním odlitku, používá litina s feriticko-perlitickou strukturou bez stop volného cementitu s obsahem feritu mezi 5 až 10% nebo grafitická litina ČSN EN GJL 250 (dřívějšího označení ČSN 42 2425). Používají se též litiny tvárné, jenž nabízí zhruba o 30% větší životnost. Nevýhodou litin je potom jejich obtížnější oprava zavařováním. Dalším vhodným materiálem pro výrobu tvarových vložek, kde zůstává litá plocha i na hotovém dílu, mohou být oceli. V našich slévárnách se používají oceli třídy 11 (např. 11573), 14 a 19 (např. ČSN EN 1.2343 - dřívějšího označení ČSN 19 552), které jsou vhodné z hlediska statické i únavové pevnosti a oproti litinám je lze bez potíží opravovat navařováním. [1, 6, 16]

Pro zlevnění a urychlení výroby jsou některé díly jako rámy, normalizované vyhazovače, pouzdra, kolíky, případně i jádra nakupovány jako díly standardní od externích dodavatelů. [6, 8]

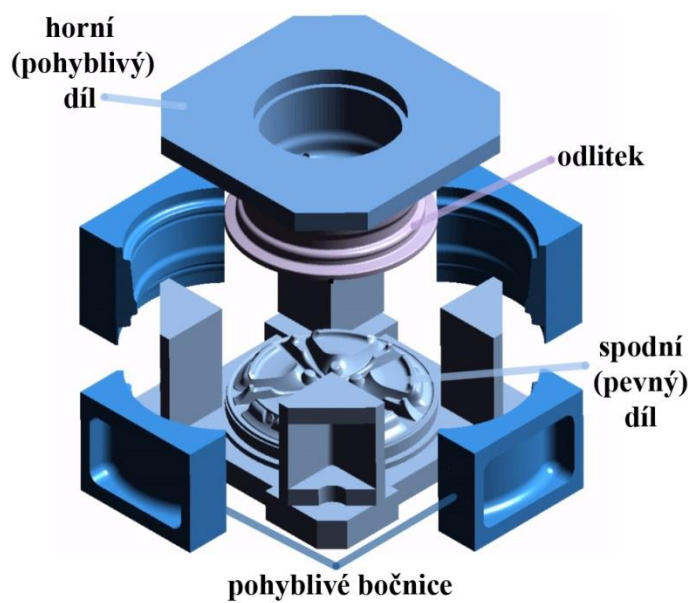
Ocelové tvarové vložky formy mohou být tepelně zpracovány, což zajistí vyšší tvrdost, houževnatost, mez kluzu, tažnost a v neposlední řadě i odolnost proti tepelnému namáhání. Pro zvýšení meze pevnosti a odolnosti proti změkčování povrchu formy se volí vysoká austenitická teplota. Proces je regulován řízením teplot kalení a rychlostí ochlazování. Nicméně pokud je zvolena nízká rychlost ochlazování, což zajistí rozměrovou stabilitu, vystavujeme se riziku změny mikrostruktury a tím snížení houževnatosti. Proto je nejprůhodnějším řešením vysoká rychlost kalení, která zajistí vhodnou strukturu a má pozitivní vliv i na životnost formy. Proces kalení vždy musí následovat popouštění. Pro ochranu před povrchovými vadami formy, o kterých se zmiňuji v kapitole 2.5, se vložky a jádra formy plazmově nitridují. Nitridace má příznivý vliv na odolnost v exponovaných místech jako jsou vtoky, jádra nebo vyhazovače. Nitridační vlastnosti jsou voleny v závislosti na chemickém složení dané oceli. [13]

2.3.1 Konstrukce formy

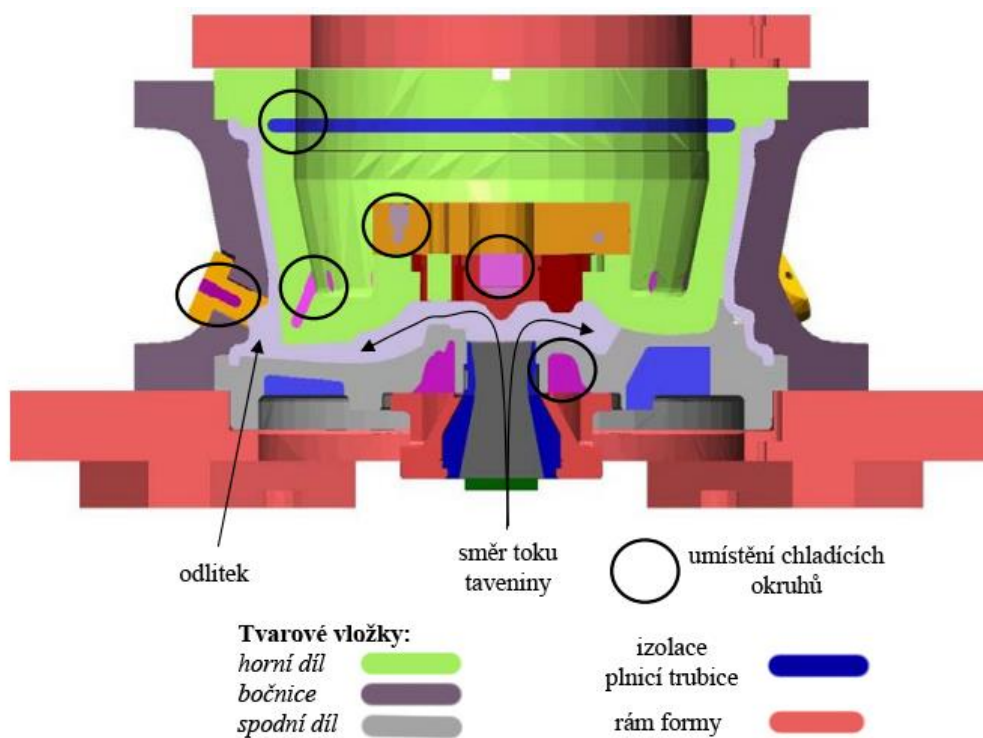
Optimální konstrukční řešení formy a nastavení všech technologických a metalurgických parametrů dává předpoklad pro výrobu odlitků bez vad. Podstatná je tedy správná konstrukce licí formy, zejména vtokové soustavy, odvzdušňovacího systému a temperačního systému. Díky nevhodné konstrukci formy se nejčastěji vyskytují vady odlitku jako nedolití, staženiny, plynové bubliny, puchýře, deformace a v neposlední řadě také rozměrové odchylky. Odstranění chyb v konstrukci formy je v mnohých případech finančně i časově náročné, přesto se však nelze některým úpravám konstrukce formy při jejím vzorkování vyhnout. [11]

Konstrukce formy je specifická svou vodorovnou dělící rovinou. Vzhledem k velké variabilitě odlitků existuje několik typů konstrukce formy. Nejjednodušší formy jsou dvoudílné (mají pouze spodní (pevný) a horní (pohyblivý) díl). Další typ konstrukce formy je tvořen ze spodního, horního dílu a 2 pohyblivých bočních částí (bočnic). Posledním typem konstrukce je případ, kdy je forma složena ze spodního, horního dílu a 4 pohyblivých bočních částí. Specialitou jsou formy s vloženými pískovými jádry. [1,6]

Na obr. 2.6 je pro ukázkou uvedena forma pro nízkotlaké lití disku automobilu. Vnější tvar odlitku je tvořen čtyřmi kovovými částmi (rozdělené po 90°), které jsou vedeny v základové desce. Mohou se pohybovat radiálně tak, aby po složení vytvořily vnější tvar odlitku. Do složené formy je shora zasunuta pohyblivá část formy, která tak uzavře formu. Posun částí formy bývá zajištěn hydraulickým systémem. Odlitek ve většině případů při rozebírání formy zůstává v horní části formy. Důvodem by byla špatná instalace vyhazovačů ve spodní části formy. Počet vyhazovačů a jejich rozmístění je volen tak, aby se odlitek při vysouvání dílu nebortil. Jejich umístění je tedy voleno do nábojů a zesílení, kde navíc působí jako chladítka. Na obr. 2.7 je potom schematické zobrazení řezu touto formou, kde je možné vidět zasazení tvarových vložek do rámu stroje a umístění chladících kanálů v tvarových vložkách. [1, 6]



Obr 2.6: Forma pro nízkotlaké lití Al kola automobilu [9]



Obr 2.7: Forma pro nízkotlaké lití Al kola automobilu [10]

Konstrukce *vtokové soustavy* se odvíjí od tloušťky stěny odlitku a nejhmotnějšího místa odlitku. Současně je nutno brát zřetel na přirozený teplotní spád, tedy aby ústí vtoku tuhlo jako poslední místo. Její součástí je vtokový kanál, kde dochází k rozpojení taveniny mezi již ztuhlým a tekutým kovem. Izolace kanálu by měla zajistit, aby v něm tekutý kov nechladl. Kvalita izolace má pak veliký vliv na rozměry vtokového kanálu. Čím je izolace kanálu dokonalejší, tím menší průměr kanálu je možné využít. Průměru kanálu je přímo úměrná délka vtokového kanálu. Kanál se musí směrem k odlitku rozšiřovat pod minimálním úhlem 3°, aby nedocházelo k zadírání a bylo zajištěno snadně vyjmutí odlitku z formy. Zároveň je při volbě rozměrů vtokového kanálu nutné brát zřetel na hmotnost odlitku. Napojení vtokového kanálu je nejúčinnější v místě nejtlustší stěny odlitku a bývá tak konstruován do středu rotační části na spodní straně formy. Zástavbu vtokového kanálu a jeho napojení na pevnou část formy je možné vidět na obr. 2.4. [6]

Základním parametrem při plnění dutiny formy je rychlost jejího plnění. Vtoková soustava musí být konstruována tak, aby kov do formy vnikal klidně a bez zbytečného víření. Toho je docíleno, pokud je zajištěno při plnění ve stoupací trubici laminární proudění. Aby však bylo docíleno laminárního proudění, musí Reynoldsovo číslo odpovídat hodnotám menším než 2100. Rychlosti taveniny v plnicí trubici lze získat úpravou Bernoulliho rovnice podle vztahu (1). Pro slitiny hliníku by hodnota rychlosti plnění neměla překročit 1,5 m.s⁻¹. [6]

$$v = \mu_h \cdot \sqrt{2g \cdot \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} - H \right)} \quad (1)$$

kde značí:

- p_1 – tlak plynu působící na hladinu taveniny v kelímku udržovací pece [Pa],
- p_2 – tlak nad hladinou taveniny ve stoupací trubici [Pa],
- H – výšku taveniny ve stoupací trubici nad úrovní hladiny v peci [m],
- ρ – hustotu odlévané slitiny [kg.m⁻³],
- g – gravitační zrychlení [m.s⁻²],
- μ_h – součinitel hydraulických ztrát ($\mu = 1,0$ až 1,5).

Z rovnice (1) je zjevné, že rychlost pohybu taveniny je ovlivněna změnou tlaku a v průběhu lití se mění.

Teplotní rozdíly mezi vstupem do formy a nejvzdálenějším místem formy musí být minimální. Pokud tomu tak není, není zajištěno usměrněné tuhnutí a je nutné do formy

zakomponovat nálitky. Ty je pak nutné izolovat, aby plnili svou funkci a kov se v nich udržel na dané teplotě co nejdéle. [6]

Dále je při konstrukci formy nutné věnovat pozornost **odvzdušnění formy**. Při stoupání kovu plnicí trubicí a dutinou formy je před taveninou vytlačován vzduch, který při nevhodném odvzdušnění vytváří vzduchové polštáře, které způsobují nezaběhnutí. Odvzdušnění musí být ještě účinnější, vkládají-li se do nízkotlaké formy písková jádra, jelikož spalovaná směs pojiv a ostřiv štěrbinu zanáší. Odvzdušnění nízkotlakých forem lze řešit: [6]

- použitím průduchu se štěrbinovými drážkami (viz obr. 2.8)
- drážkováním vedení trnů
- štěrbinami v dělicí rovině
- vřítí u vyhazovačů
- štěrbinami provedenými ve vložkách



Obr 2.8: Odvzdušňovací síťka z oceli (vpravo)[24] a jejich umístění ve formě (vlevo) [16]

Během lícího cyklu dochází k extrémním změnám teploty v povrchové vrstvě formy, což časem vede ke vzniku vad na lici formy. Aby se jednotlivé části nízkotlaké formy v provozu nepřehřívaly nebo se naopak nepodchlazovaly, jsou formy opatřeny **temperačním systémem**. Pracovní teplota forem by se při odlévání slitin hliníku měla pohybovat mezi 250 až 450 °C a ovlivňuje takové faktory jako tuhnutí odlitku, zabíhavost taveniny, schopnost separátoru ulpívat na povrchu formy a ovlivňuje i samotnou životnost formy. [6, 8]

Lící cyklus začíná vstupem roztavené taveniny do formy, která je přehřátá na pracovní teplotu. Tavenina se dostává do kontaktu s lícem formy a poměrně rychle chladne.

Po přeměně do tuhého stavu se odvod tepla zpomalí. Následuje otevření formy a vyjmutí odlitku, kdy je forma otevřena do té doby, dokud nezačne další cyklus. [14]

Rozhodujícím procesem při utváření odlitku ve slévárenské formě je sdílení tepelné energie mezi odlitkem a slévárenskou formou. Jak je obecně známo, odlitek teplenou energii uvolňuje a naopak forma tepelnou energii přijímá. Nicméně celý proces je komplikovanější tím, že proces přenosu energie se děje mezi taveninou a kovovou formou během celého licího cyklu. Tepelné poměry tudíž závisí na tepelně-fyzikálních vlastnostech formy, na vlastnostech odlévaného materiálu i na podmínkách sdílení tepla na jejich rozhraní. [6]

Sledování celého procesu je velmi obtížné, neboť v soustavě odlitek – forma probíhá řada pochodů, z nichž nejvýznamnější jsou [6]:

- a) přenos tepla v tekutém kovu,
- b) přenos tepla z taveniny do slévárenské formy,
- c) uvolňování skupenského tepla při tuhnutí a fázových přeměnách,
- d) přestup tepla mezi tekutým a ztuhlým kovem v odlitku,
- e) vedení tepla tuhým kovem,
- f) přestup tepla z formy do okolí.

Mezi formou a odlitkem dochází k výměně tepla [6]:

- a) *Vedením (kondukcí)* – se teplo šíří především v tuhé fázi, kdy teplo přechází od částice k částici jejich přímým stykem.
- b) *Prouděním (konvekci)* – je teplo převáděno mezi fázovým rozhraním a hlavním proudem pohybujícího se média (nejčastěji tekutiny) a to vedením v hraniční vrstvě a pohybem větších shluků molekul předávající teplo od hraniční vrstvy do vzdálenějších míst.
- c) *Sáláním (radiací)* – jedná se o šíření energie ve formě elektromagnetického vlnění.

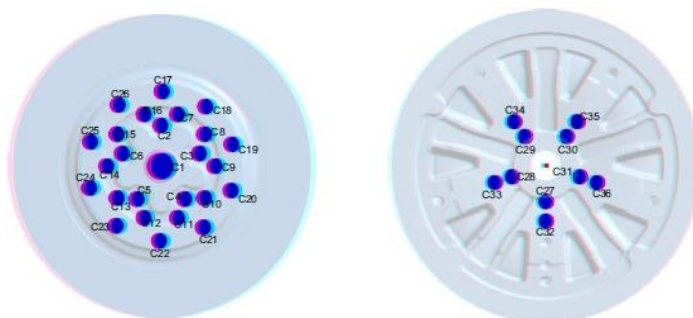
Jak již bylo uvedeno, teplo z tuhnoucího odlitku je odváděno formou. Toto teplo je potřeba odvést při každém licím cyklu. Přílišné přehřátí formy by způsobilo nalepování slitiny na dutinu formy, deformaci a jeho zadírání při vyhazování odlitku a také výrazné snížení životnosti formy. [6]

Před začátkem lití se forma musí rovnoměrně předeheřt na pracovní teplotu, která se volí podle tloušťky stěny odlitku. U nízkotlakých forem je toho možné docílit buď elektrickým ohřevem, nebo pomocí plamene. V některých případech je možné již nahřátou formu z procesu přípravy separačního postřiku uložit do stroje a formu dohřát na pracovní teplotu za pomoci výroby jednoho odlitku (tzv. rozjezdového kusu), který vnese do formy dostatek tepla. [6, 17]

Ve formě je kromě stále teploty nutno udržovat i teplotní spád. Ten bývá u nízkotlakých forem přirozený zejména díky umístění vtoku uprostřed spodní (pevné) části formy. Usměrněnému tuhnutí odlitku dále napomáhá umístění temperačních kanálů ve formě, kterými proudí médium. Pro výrobu odlitků bez vnitřních vad a vad povrchových bývá využíváno umělé řízení tuhnutí odlitku, kde je teplotní pole rozděleno do jednotlivých pásem s možnostmi regulace teploty [6, 8].

Jako chladicí, resp. temperační médium, se běžně využívá voda, vzduch nebo případně kombinace okruhů s dvěma různými médii. Nejčastěji používaným temperačním médiem je **vzduch** o vstupní teplotě 20 – 30 °C, který se využívá u forem pro výrobu tenkostěnných odlitků a dále **voda** se vstupní teplotou kolem 20 °C, která se používá zejména pro chlazení přehřívajících se částí formy. [17]

Ukázka provedení temperačního systému formy je znázorněna na obr. 2.9. Jsou zde znázorněny obě části formy pro výrobu hliníkového disku pro automobil. Kanál s označením C1 je chlazen vodou, kdežto kanály C2 až C26 chladí vzduch. Spodní část formy je již pak celá chlazená pouze vzduchem. [18]



Obr. 2.9: Rozmístění chladicích kanálků v horní (vlevo) a spodní (vpravo) části formy ALU disku [18]

Tavenina v průběhu lícího cyklu negativně působí na pracovní povrch kovové formy, kde se postupně zhoršuje kvalita povrchu. S cílem zabránit přímému styku taveniny s formou se používají separační prostředky, kterým se věnuje následující kapitola. [6]

2.4. Postřík nízkotlakých forem

Pro nízkotlaké lití do kovových forem je velmi důležitým činitelem, který ovlivňuje povrchovou a také vnitřní kvalitu odlévaných dílů, separační postřík. Volba vhodného postříku a metody jeho nanášení je přinejmenším stejně důležitá jako ostatní faktory procesu nízkotlakého lití zastoupené konstrukcí formy, typem odlévané slitiny nebo teplotou taveniny.[23]

Tím hlavním důvodem využití separačních postříků je zejména ochrana tvaru kovové formy před erozivními účinky proudícího tekutého kovu a vytvoření ochranné vrstvy bránící nalepení taveniny na líc formy, což má pozitivní vliv na životnost formy. Výsledkem toho je zvýšení produktivity a snížení investic do údržby formy. Dále separátor snižuje tepelný náraz na formu při nalití a zmenšuje její povrchové přehřátí. Podporuje také teplotní gradient, čímž přispívá k vnitřní homogenitě odlitku, zlepšuje vyjímání jader a celkové odformování. Díky separačním prostředkům je možné vyrábět odlitky lepší povrchové kvality, čímž se snižuje cena odlitku za dokončující operace. V neposlední řadě se při lití slitin Al-Si vlivem snížení povrchového napětí zlepšuje zabíhavost taveniny v dutině formy. [19, 20, 23]

Se separačním prostředek jako takovým je nutné počítat i v čím dál tím více se rozšiřujících simulačních softwarech. Pro co nejbližší přiblížení reálným podmínkám lití je nutné v okrajových podmínkách správně definovat koeficient přestupu tepla. [19]

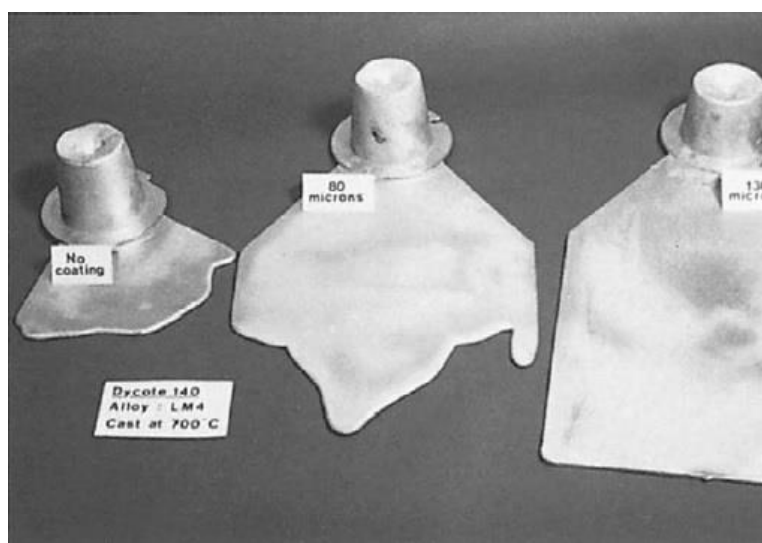
Podle charakteru tepelného ovlivnění je možné *separační prostředky* dělit na [19]:

- ***Izolační*** – mají za úkol formu izolovat a v daném místě udržet kov po dlouho dobu tekutý. Z pravidla se jich využívá u nálitků, vtokových soustav a tenkostěnných částí odlitku;
- ***Polovodivé*** – své využití nacházejí jako základní vrstva separátoru a nejčastěji se aplikují na tvarové plochy formy;
- ***Vodivé*** – aplikují se do částí formy (tepelné uzly), odkud je nutné odvést teplo, a v daném místě odlitek zchlazují;

Postup aplikace jednotlivých postřiků je vždy uveden v technologickém postupu pro výrobu daného odlitku. Každá forma je výjimečná, má předepsanou kombinaci postřiků spolu s předepsanými místy pro aplikaci konkrétních typů. Pouze v ojedinělých případech je na formu použit pouze jeden typ postřiku. [19]

Zatímco formy běžně pracují za teplot 250 až 400 °C, ochranný postřík se nanáší na očištěnou a předem přehřátou formu v rozmezí 160 až 250 °C, přičemž záleží na druhu separačního prostředku. Ohřev formy probíhá elektricky nebo pomocí plynových hořáků. Je nutné formu lehce přehřát a poté nechat zchladnout na teplotu nanášení, aby došlo k rovnoměrnému prohřátí všech částí formy. Po nanesení postřiku je nutné formu přehřát na pracovní teplotu. [19, 23]

Významným faktorem, který hraje roli v přestupu tepla mezi odlitkem a formou je tloušťka nanesené vrstvy separátoru. Nedbalé nanesení nového postřiku přes již stávající vrstvu by tak zajisté mělo negativní vliv na vzhled budoucího odlitku. Zejména v případě izolačních separátorů, které nabízejí lepší zabíhavost taveniny, je nutné tloušťku vrstvy kontrolovat. Tloušťka nanesené vrstvy závisí na druhu postřiku. Izolační postříky se pokrývají ve vrstvě mezi 150 a 250 μm . Oproti tomu jemné vodivé postříky mají tloušťku mezi 30 a 50 μm . Na obr. 2.10 je při testu odlévání jednoduché destičky z hliníku vidět vliv tloušťky vrstvy silně izolačního separátoru DYCOTE 140 na tok taveniny. [3, 23]



Obr 2.10: Vliv tloušťky nanesené vrstvy separátoru na tok taveniny [3]

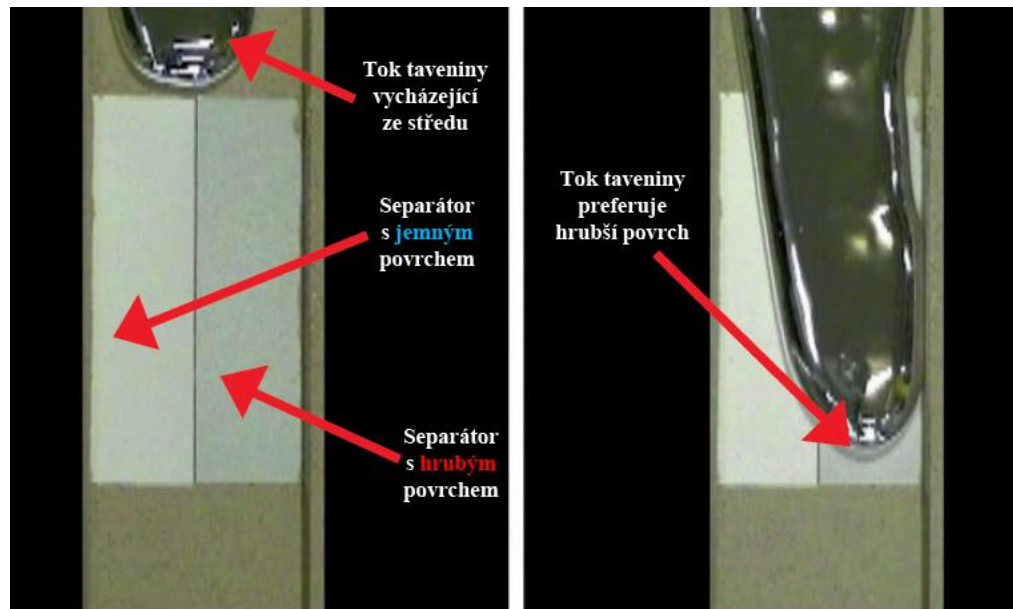
Mezi hlavní složky separátorů patří [14, 23]:

- **Plniče** – jejichž základem jsou prvky jako je TiO_2 , Al_2O_3 , talek, slída, oxidy železa nebo SiO_2 , které při běžných licích teplotách pro hliník (650-800 °C) nebudou chemicky reagovat s taveninou. Důležitá je především tepelná vodivost těchto prvků, případně tvar a velikost jejich zrn;
- **Pojiva** – jak již název napovídá, jsou to prvky, které v separátoru zajišťují vnitřní vazbu. Ve většině případů to je křemičitan sodný v kombinaci s Na_2O . V menší míře se lze setkat s pojivy na bázi jílu nebo škrobu;
- **Nosič** – neboli voda je v dnešní době nejčastější přísadou pro ředění koncentráту. Poměr vodní složky v separátoru záleží na typu postřiku, nicméně vždy bývá tou složkou poměrově větší. Vodivé separátory se běžně ředí v poměru 1:5 až 1:15, kdežto separátory izolační nejčastěji pracují s poměry 1:2, 1:3 a 1:5. Po ekologické stránce je voda ideálním ředidlem směsi a je bezpečnější v porovnání s historicky využívanými rozpouštědly, jelikož neobsahuje výbušné látky. Pokud je voda dobře zpracována a demineralizována, neznečišťuje povrch formy a nezanáší aparaturu nanášecího zařízení. Množství minerálů ovlivňuje tvrdost vody, která dále ovlivňuje směs separátoru. Voda se chová jinak než rozpouštědla, jelikož má pouze jeden bod varu. Díky tomu při styku s horkým povrchem okamžitě přechází do plynného skupenství a tím odebírá teplo z povrchu formy. Pokud slévárna používá tvrdou vodu, která obsahuje velké množství minerálních látek, jako je vápník, hořečnaté soli, volné železo a síra, může dojít k limitnímu zanesení nanášecí aparatury natolik, že bude protékat jen zlomové množství. K tomu dochází často, i pokud slévárna používá změkčovadla vody a vodu filtruje. Pomocí deionizace vody je možné vodu efektivně zbavit všech minerálů, volného železa, síry a jiných nečistot.

2.4.1. Funkce postřiků

Regulace přestupu tepla z taveniny do nízkotlaké formy je bezpochyby velmi důležitou vlastností separačního postřiku, jelikož je díky ní možno částečně řídit usměrněné tuhnutí odlitku a plnění formy. O tepelných vlastnostech separátoru rozhoduje zejména

koeficient přestupu tepla. Čím více je separátor izolační, tím nižší je hodnota koeficientu přestupu tepla. Silně izolační výmazky tak mívají hodnoty mezi 400 až 500 W/m². Jako příklad nanesení tlusté izolační vrstvy je možné uvést oblasti okolo vtoku, kde je nutné, aby odlitek přešel do tuhého stavu jako poslední. Oproti tomu velmi vodivé postříky mají koeficient přestupu tepla až 1550 W/m². Stupeň izolace ovlivňuje chemické složení separátoru, metoda aplikace separačního prostředku a tloušťka nanesené vrstvy. [19, 23]



Obr 2.11: Tavenina pohybující se po vodivém (levý vzorek) a izolačním (pravý vzorek) separátoru [23]

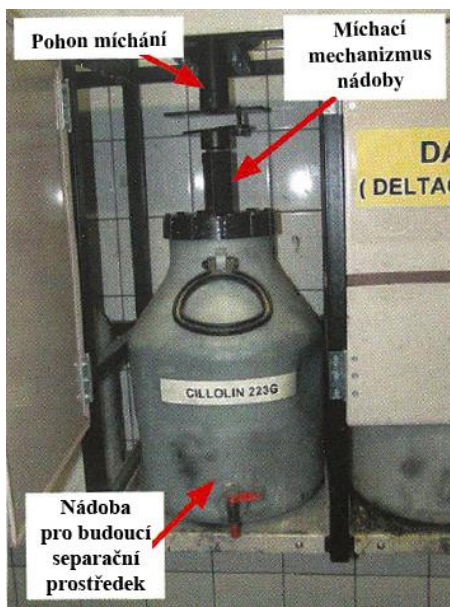
Mezi funkce separátoru se také řadí možnost **ovlivnit tok taveniny**. Příklad takového ovlivnění je k vidění na obr. 2.11, kde tavenina preferuje pohyb po izolačním separátoru. Je zde vidět, že po jemnějším povrchu vodivého separátoru se tavenina pohybuje pomaleji a má tak více času na předání tepla do formy. Nicméně dochází ke snížení zabíhavosti kovu, což může vést k neúplnému vyplnění formy nebo ke vzniku studených spojů. Oproti tomu kontakt mezi taveninou a povrchem izolačního separátoru je značně nižší. Mohou za to větší částice plniče izolačních separátorů. Ty nedovolí tak dokonalý kontakt s povrchem izolačního separátoru a tavenina se může pohybovat rychleji. Tok taveniny ovlivňuje taktéž drsnost těchto částic. Hrubá struktura povrchu natrhává oxidickou vrstvu taveniny a ta se tak lépe udržuje v tekutém stavu. Vysoké povrchové napětí taveniny ve spojení s ostrými hranami

částic plniče izolačních separátorů tak umožňuje snazší pohyb taveniny. Nicméně během lití dochází vlivem tuhnutí odlitku a jeho vyjímání z formy k mechanickému odírání separátoru a tím se ostré hrany jeho částic postupem času zjemňují. [23]

Zjednodušit vyjímání odlitku by měl grafit, který se používá v koloidním nebo v semi-koloidním stavu. Může být obsažen již v základním složení separátoru nebo je možná jeho aplikace v samostatné vrstvě na základní separátor, čehož se často využívá v místech, kde je vyjmutí odlitku z formy obtížnější. U izolačních separátorů se k jednoduššímu vyjmutí odlitku z formy využívá obsahu nitridu bóru, jenž je stejně jako grafit uspořádán do hexagonální krystalické mřížky. Nitrid bóru snižuje smáčivost tekutého hliníku, přičemž zvyšuje žáruvzdornost postříku. [23]

2.4.2. Technologie postříku

Vlastnosti separačních prostředků se odvíjí již od jejich samotného *skladování a přípravy*. Sklad by měl být umístěn v suchém a uzavřeném prostoru bez přístupu slunečního světla. Díky tomu že se jedná o vodou ředitelné produkty, jsou náchylné vůči mrazu. Ideální teplota skladování by se měla pohybovat mezi 10 a 25 °C. Vyšší teplota by vedla ke změnám jeho viskozity a k jeho biodegradaci. [23]



Obr 2.12: Nádoba pro přípravu postříku s míchacím zařízením [19]

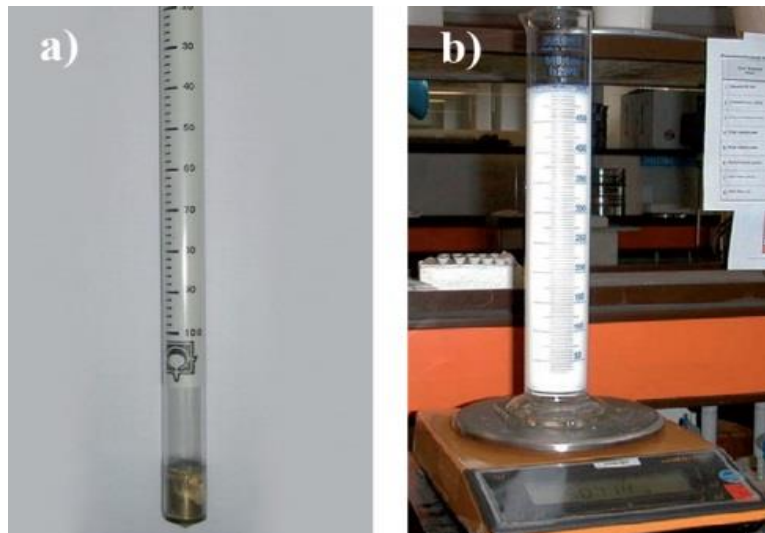
Namíchání postřiků na požadované poměry probíhá v automatických míchačkách nebo volně. Automatické míchání, které je možné vidět na obr. 2.12, zajišťuje prevenci proti sedimentaci postřiku na dně nádoby. Namíchaný produkt je nutné uchovávat zakrytý. Předchází se tím odpaření vody a kontaminaci směsi nečistotami. Slévač si takto připravené postřiky nabírá do rosenek nebo stříkacích pistole a aplikuje je na dutinu formy. [19, 23]

Proces přípravy postřiku se provádí v tomto sledu: [23]

- do nádoby se přidá $\frac{1}{3}$ až $\frac{1}{2}$ celkového množství vody;
- za běhu mixéru je postupně přidáno správné množství koncentrovaného separátoru, dokud nevznikne hustší hmota bez hrudek;
- koncentrát je postupně dále ředěn vodou až do požadované hustoty pro aplikaci separačního prostředku.

Klíčovým parametrem před nanesením separačního postřiku je jeho hustota. **Kontrola měřením hustoty** se provádí vždy na začátku směny a při namíchání nové dávky. K měření se nejčastěji používá metoda vážení v odměrném válci. Využívá se také měření pomocí pyknometru, která je svým principem velmi podobná metodě vážení v odměrném válci. Méně používaná je poté metoda Baumé. Tyto metody je možné porovnat na obr. 2.13. Při metodě vážení v odměrném válci se postupuje takto [19]:

- vynulování prázdného odměrného válce na digitální váze;
- odběr řádně promíchaného postřiku do odměrného válce o známém objemu;
- zvážení postřiku na digitální váze;
- výpočet hustoty;
- porovnání naměřené hustoty s tabulkovou hodnotou dodávanou výrobcem koncentrátu.

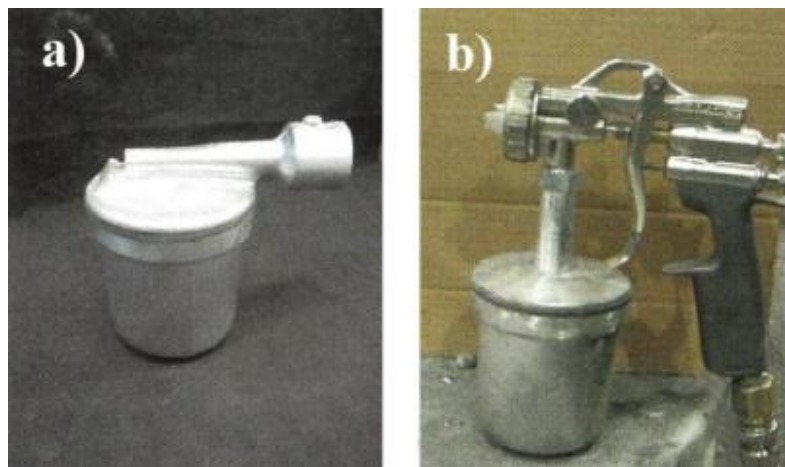


Obr 2.13: Měření hustoty za pomoci – a) metody Baumé, b) vážení a objemu [23]

Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly 2.4, před nanesením postříku se musí forma, náliťkové části, vtokové části, ale například i jádra předeřhřát na teplotu odparu vody, což zároveň zajistí i odmaštění reziduí z nástrojárny. Nicméně před samotným nanesením je nutné provést čištění formy.

Čištění je možné provést abrazivně za pomoci otryskání ocelovou nebo skelnou drtí, případnou variantou je použití ocelových kartáčů. Zástupcem neabrazivní metody je tzv. kryogenní otryskání - tryskání peletkami pevné fáze CO₂ neboli suchým ledem. Tento druh čištění využívá okamžitou sublimaci suchého ledu a velkého teplotního gradientu mezi formou (350°C) a peletami suchého ledu (-79°C). Tryskání suchým ledem prodlužuje životnost formy, je velice šetrné k tvarovým částem formy, které lze tryskat přímo na stroji bez nutnosti zchladnutí, demontáže, zpětné montáže a opětovného dlouhého ohřevu. Nutno podotknout, že takto připravený povrch není srovnatelný s povrchem po konvenčním tryskání ocelovou drtí. [19, 23]

Pokud je forma očištěná a předeřhřátá, je možné přistoupit k **aplikaci postříku**. Existuje několik metod aplikace postříku, např. pomocí kartáče nebo smáčením, nicméně ta nejobvyklejší je pomocí rosenky a stříkací pistole. Rosenky a stříkací pistole, které je možné vidět na obr. 2.14, musí být čisté a správně seřizené (nastavení trysky, vstupního tlaku vzduchu), a to především z důvodu zajištění nanesení potřebné vrstvy postříku a její celistvosti. [19, 23]



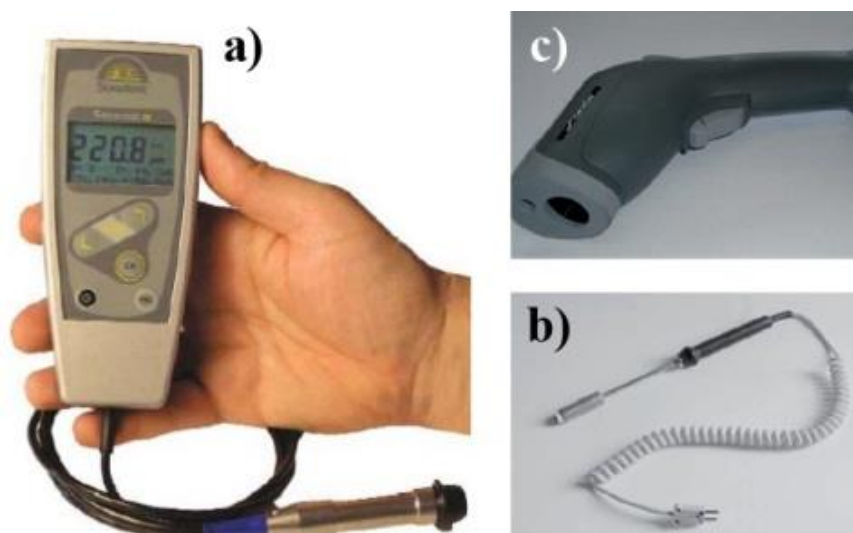
Obr 2.14: a) *Rosenka*, b) *Stříkací pistole* [19]

Zásady při nanášení postříku [23]:

- naplnit nádobku stříkací pistole jen takovým množstvím, které bude opravdu využito;
- postřík ve stříkací pistoli používat bez větších přestávek (> 10 minut);
- pohyby pistolí musí být plynulé, bez přerušení a rychlé;
- dodržet vzdálenost mezi pistolí a formou v rozmezí 20-30 cm;
- stříkací pistol je nutné držet v kolmém směru vůči formě;
- upřednostnit nanesení ve více tenkých vrstvách před jednou nebo dvěma tlustými vrstvami;
- před nanesením další vrstvy nechat tu předchozí zaschnout;
- operátor by měl postřík nanášet z různých směrů, aby se vyhnul akumulaci postříku na jednom místě;
- nežádoucí je nechat stékat postřík po formě;
- po použití je nutné vždy nanášecí zařízení umýt;

Aby bylo možné dodržet podmínky při nanášení postříku, je nutné během procesu nedestruktivně ***kontrolovat tloušťku postříku a teplotu povrchu formy***. Měření tloušťky nanesené vrstvy je vcelku obtížný proces pro pracovníky, jelikož měření probíhá na velmi horké formě. Dnes se k tomuto účelu nejčastěji využívá měřidel, která jsou popsána v kapitole 2.4.3. a jejich příklad je možné vidět na obr. 2.15a. K tomu aby bylo docíleno dokonalého spojení mezi formou a postříkem, je nutné kontrolovat teplotu formy při nanášení postříku.

Teplotu je možné zjistit za pomoci kontaktního termočlánu (2.14b) nebo relativně pohodlněji za pomoci pyrometru (2.14c). [23]



Obr 2.15: Měřidla separačních postřiků – a) ultrazvukový SONACOAT II F, b) kontaktní termočlánek, c) pyrometr [23]

2.4.3. Metody hodnocení vlastností povrchu separátoru

Vrstvy separátoru musí při použití na povrchu formy plnit určitou funkci, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4.1. Z tohoto důvodu je nutné hodnotit a zkoumat jejich fyzikální a mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti lze hodnotit pomocí tribologie, která hodnotí tření a odolnost proti opotřebení. Opotřebení, jenž je charakteristické odstraněním nebo přemístěním částic hmoty z povrchu materiálu mechanickým účinkem, je obvykle doprovázeno fyzikálními nebo chemickými jevy. Při porušení povrchu může docházet k přenosu materiálu z jednoho povrchu na druhý či ke vzniku volných částic. Mezi fyzikální vlastnosti pro hodnocení separačních postřiků lze zařadit tloušťku nanesené vrstvy nebo drsnost povrchu. [25]

Hodnocení mechanických vlastností

Tribologie se zabývá chováním dvou pohybujících se těles, které jsou ve vzájemném kontaktu. Interakcí obou povrchů těles vzniká opotřebení a dochází k úbytku materiálu. Pomocí měřicího přístroje, který se nazývá tribometr, lze zjistit koeficient tření nebo případně třecí sílu. Tribologický model se skládá z blízkého okolí, dvou třecích ploch a látky (v případě

mazání či chlazení), která se nachází mezi nimi. Difúzí částic při kontaktu mezi materiály a abrazi nerovností na jejich povrchu při pohybu těles vzniká v tribologickém systému třecí síla. [26, 27]

Třecí síla působí proti relativnímu pohybu dvou těles, která jsou ve vzájemném kontaktu. Velikost této síly je závislá na faktorech jako teplota, tlak, vlhkost, zkušební prostředí nebo geometrické a mechanické vlastnosti povrchu. Velikost tření udává koeficient tření μ , který lze vypočítat dle vzorce (2), jenž je znám také jako Coulombův zákon [26, 27]:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2)$$

kde značí: F – třecí sílu [N],

N – přítláčnou sílu [N]

Vlivem odlišných druhů a rychlostí pohybu nastávají různé druhy tření [27]. Dle místa působení ho lze rozdělit na **vnitřní a vnější tření**.

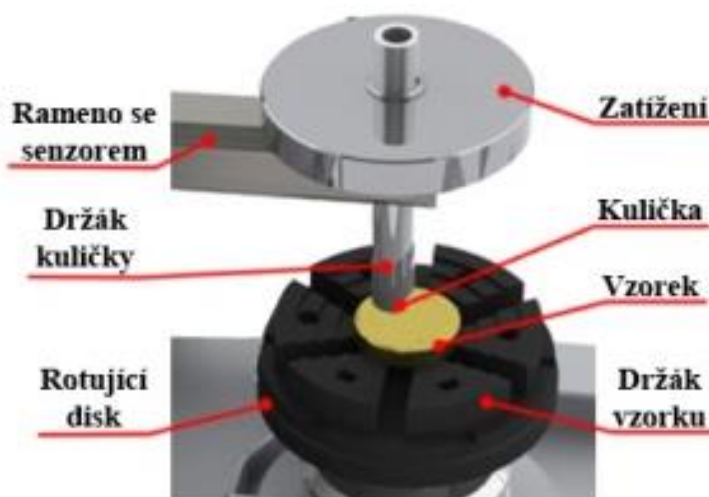
Vnitřní tření je specifikováno jako odpor, který působí proti vzájemnému pohybu molekul uvnitř tělesa. [26]

Vnější tření probíhá na povrchu pevné látky vůči kapalině či jiné pevné látce. Tření dvojice **pevná látka vůči pevné látce** lze dále rozdělit na statické a dynamické. Největší práce je zapotřebí pro uvedení tělesa do pohybu (statické tření), přičemž se tato práce mění převážně v teplo. V případě pohybujícího se tělesa (dynamické tření) již není nutné vyvíjet takovou práci, jelikož stačí pouze energie pro udržení tělesa v pohybu. V případě třecí dvojice **kapalina vůči pevné látce** je koeficient tření nejvíce ovlivněn viskozitou dané kapaliny. [27]

Vzhledem k tomu, že v rámci experimentu bude využíván pro hodnocení odolnosti ochranného nástřiku líce formy mechanickému poškození **tribometr pro suché a kapalné tření** a použita **metoda „Ball-on-Disc“**, je dále pozornost věnována právě této metodě.

Jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, tribometr je přístroj sloužící k simulaci procesu tření a následnému opotřebení sledovaných povrchů. Na základě provedených zkoušek na tomto přístroji lze určit vliv zvolených parametrů (zatížení, rychlost otáčení, délka drah) na funkčnost a odolnost zkoumaného povrchu.

Princip tribometru spočívá v působení přitlačované kuličky (v případě metody „Pin-on-Disc“ je zatěžujícím tělesem hrot) na povrch pohybujícího se vzorku po určitou dobu po dané dráze. Tribologická metoda „Ball-on-Disc“ je specifická tím, že místo hrot je použita kulička, pevně zafixovaná v držáku, která vykonává kluzné tření po povrchu disku. Kulička (protikus) může být z různých materiálů, např. keramika, ocel, barevné kovy aj. Na rameni přístroje (obr. 2.16) je zároveň umístěno i závaží. Vzorek je upevněn pomocí kruhového svěrače. Aby se předešlo případným vibracím, je přístroj vybaven anti-vibračním stolem. Princip i jednotlivé komponenty jsou znázorněny na obr. 2.16. [28]



Obr 2.16: Tribometr – schéma metody “Ball-on-Disc” (upraveno) [28]

Pohyb zkoumaného vzorku vůči kuličce může být lineární (např. pro hodnocení lineární vedení) nebo rotační (např. pro hodnocení vaček, součástí motorů a další součástek konajících vůči sobě rotační pohyb). Podle účelu testování je třeba zvolit jednu či druhou variantu pohybu stolku. [28]

Díky vzájemnému působení kuličky a vzorku dochází během pokusu k usazení odtrženého materiálu ze vzorku na kuličku a naopak. Tento jev způsobuje změny v třecích vlastnostech materiálu, což ale přibližuje pokus k reálným podmínkám při provozu. V průběhu zkoušky však kulička ztrácí svůj tvar a původní kontaktní bod se mění na kontaktní plochu. Při kontaktu kuličky s rovným povrchem vzorku vzniká tzv. Hertzův tlak. Tento tlak vzniká v místech kontaktu dvou těles s definovaným zakřivením povrchu, mezi nimiž dochází k vzájemnému silovému působení. Metoda „Ball-on-Disc“ je specifikována nekonečně

velkým zakřivením zkušebního vzorku (plochý vzorek) a zakřivením kuličky, které je definováno jejím poloměrem. [28]

Opotřebení testované vrstvy závisí také na materiálu kuličky. Pokud je kulička měkčí než testovaný vzorek, dochází prakticky jen k otěru kuličky. Je-li tomu naopak, je obrušován pouze vzorek. Jestliže má kulička srovnatelnou tvrdost s testovaným vzorkem, opotřebení se projeví u obou subjektů. Vyhodnocení je potom provedeno zkoumáním opotřebení kuličky i vzorku. Hloubku a šířku profilu, který kulička zanechala v testovaném vzorku a opotřebení kuličky, je možné sledovat pomocí konfokálního mikroskopu. [28]

Přístroj také umožňuje použití různých druhů maziv. Vzorek bývá ponořen do vaničky s mazivem, kterou je následně možné i vyhřívat.

Dále je také možné provádět testy při teplotní zátěži vzorku. Maximální hodnota teploty, na které lze vyhřát kuličku společně se vzorkem je přibližně 1000 °C.

Hodnocení fyzikálních vlastností

Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly 2.4, ***tloušťka nanesené vrstvy*** separátoru hraje významnou roli v přestupu tepla mezi odlítkem a formou. Tloušťka nanesené vrstvy se obvykle udává v μm . Ve slévárnách se dnes nejčastěji používají nedestruktivní metody na principu magnetické indukce, vířivých proudů, ultrazvuku atd. [3, 27]

Nejjednodušší způsob měření tloušťky nemagnetických vrstev (kovových i nekovových) na magnetickém podkladu představuje ***magnetická metoda***. Metoda spočívá v měření velikosti síly, která je potřebná k odtržení permanentního magnetu z feromagnetického materiálu. [27, 29]

K měření tloušťky nemagnetických vrstev (např. laky, nátěry, Zn, Cu, Cr, atd.) na feromagnetickém podkladovém materiálu je také možné použít ***magneticko – indukční metodu***. Princip této metody je založen na měření vzdálenosti sondy od feromagnetického podkladu metodou měření intenzity magnetického pole. Měřicí sonda je složena z feromagnetického jádra, na kterém jsou dvě vinutí. Jestliže se do blízkosti sondy přiblíží feromagnetický materiál, zesílí magnetické pole budícího vinutí a na snímácím vinutí se to projeví zvětšením elektrického proudu, který je mírou tloušťky povlaku. [29]

Další možností je **metoda vířivých proudů**, která se používá pro měření tloušťky elektricky nevodivých materiálů (např. laky, nátěry, atd.) nanesených na elektricky vodivém a nemagnetickém materiálu (např. na hliníku, zinku nebo mědi). Princip měření tloušťky spočívá v měření vlivu vířivých proudů ve vodivém podkladu. [29]

Poslední použitelnou metodou pro měření tloušťky separátoru na lící formě je **metoda ultrazvuková**. Tato metoda umožňuje rozpoznání a změření více vrstev nanesených jakémkoliv materiálu (např. kov, plast, atd.). Podmínkou je ale, že každá nanesená vrstva má jinou šířitelnost vlnění. Princip spočívá v přiložení sondy k měřenému vzorku, na který se do místa kontaktu aplikuje gel pro zvýšení přilnavosti. Sonda vysílá ultrazvukové vlnění (10 -20 Hz). Část vlnění při přechodu z jednoho prostředí (jedné vrstvy) do druhého projde dál, část se odrazí zpět. Tyto odražené vlny se zpracují, vyhodnotí a slouží k určení tloušťky jednotlivých vrstev. [29]

2.4.4. Životnost a vady postřiků

Separační postřík se během odlévání vlivem vyjímání odlitku z líce formy mechanicky odírá, čímž dochází k jeho degradaci. Snižují se jeho tepelné vlastnosti, ať už vodivost nebo izolace, a to především z důvodu závislosti mezi tloušťkou separačních postřiků a koeficienty přestupu tepla. Velmi důležité je optimálně nastavit četnost obnovy separačního postříku pro konkrétní odlitek. Tato nastavení ovlivňuje především tvarová složitost odlitku a samotná konstrukce formy. [19]

Činitelé, kteří mají vliv na životnost separačního prostředku, jsou [23]:

- Užitá pojiva v separačním prostředku;
- Metoda nanesení;
- Tloušťka postříku;
- Teplota formy během nanášení;
- Poměr ředění.

Životnost separačního prostředku zvyšuje využití křemičitanu sodného v kombinaci s Na_2O nebo SiO_2 , jenž je obsažen v pojivu. Ten velmi dobře odolává vysokým teplotám, jejich změnám a napomáhá proti tvorbě trhlin.

Zásadní vliv na životnost separátoru má teplota formy před aplikací separátoru. Pokud je teplota příliš nízká, dochází k nedokonalému odpaření vodní složky a postřík tvoří neproniknutelný film, který se pak díky uzavřené vodě ve formě parních puchýřů odlupuje od formy. Pokud je teplota formy naopak nadměrně vysoká a voda se odpaří příliš intenzivně, žáruvzdorné prvky obklopené filmem vody a křemičitanu sodného neudrží soudržnost a odskakují i od samotné formy. Výsledkem je slabá a hrubá vrstva, která se snadno odloupne.

Nejčastější případy poruch postříků i s jejich příčinami znázorňuje tab. 2.1. [23]

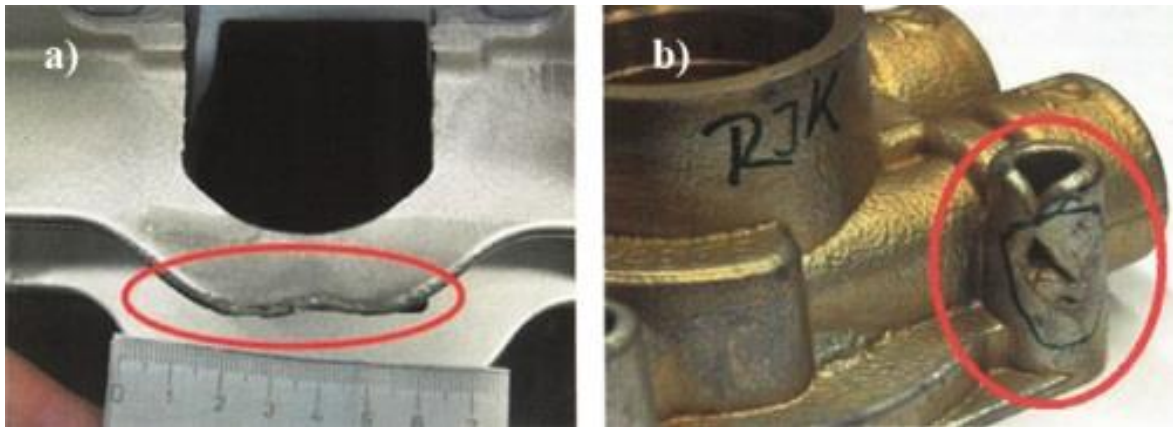
Tab. 2.1: *Vady separačního postříku a jejich příčiny [23]*

Vločkování separátoru	Brzké opotřebení separátoru	Separátor nepřílně k formě	Nerovnoměrný povrch separátoru
Vrstva je příliš tlustá	Příliš velká vzdálenost nanášení	Nedostatečné čištění formy před postříkem	Separátor nedostatečně naředěn
Separátor nedostatečně naředěn	Vysoká teplota formy	Nevhodná teplota formy	Příliš malá vzdálenost nanášení
Nedostatečné čištění formy před postříkem	Separátor nedostatečně naředěn		Opotřebovaná tryska stříkací pistole
Nízká teplota formy	Znečištěný separátor		Malý tlak ve stříkací pistoli

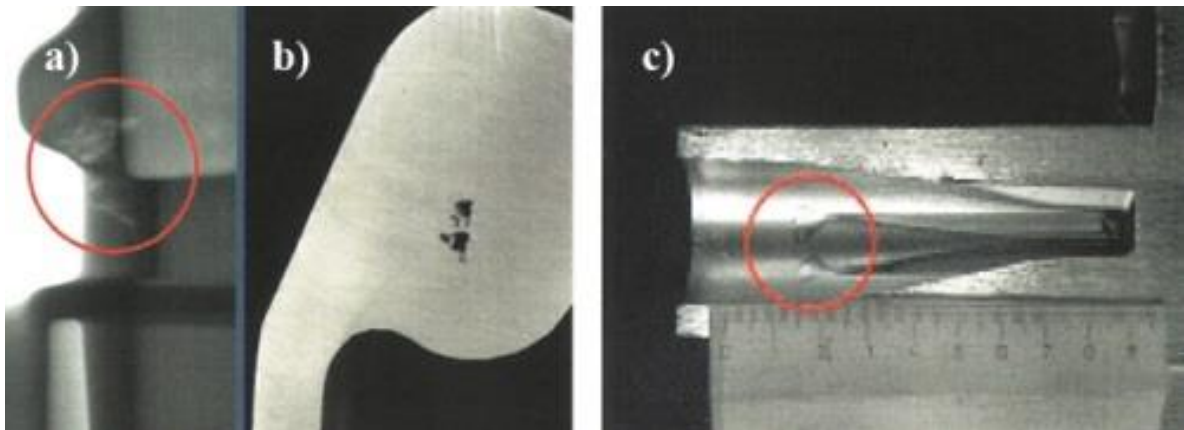
Vady separačního postříku a jeho opotřebení v procesu lití způsobují u odlitků nejčastěji tyto vady [19]:

- **Nezaběhnutí** – po opotřebovaném postříku se tavenina hůře pohybuje a špatně zabíhá, viz obr. 2.17 a;
- **Zavaleniny / studený spoj** – forma ztrácí teplotně izolační schopnosti a tavenina se hůře pohybuje po opotřebované vrstvě postříku, viz obr. 2.17 b;

- **Řediny** – opotřebovaný postřík neplní svojí funkci při zajištění teplotního spádu, viz obr. 2.18 a, b;
- **Odvařeniny** – příliš tenká vrstva postříku nebo dokonce žádná vrstva způsobuje nedostatečné lokální odvzdušnění kovové formy. Děje se tak proto, že povrch dutiny formy má nízkou hodnotu drsnosti povrchu Ra. Ta zpravidla odpovídá obráběným či broušeným povrchům, tj. $Ra = 1,6$ až $0,8 \mu m$. Čím je nižší drsnost povrchu formy, tím vyšší pravděpodobnost vzniku vady, viz obr. 2.18 c.



Obr 2.17: Vady odlitku – a) nezaběhnutí žebra, b) zavalenina [19]



Obr 2.18: Vady odlitku – a) ředina detekovaná při RTG zkoušce odlitku, b) ředina viditelná na metalografickém výbrusu, c) odvařenina [19]

2.5. Životnost formy

Životnost formy je ovlivněna mnoha faktory. V první řadě je závislá na samotném materiálu formy a jejím tepelném zpracování. Dále je nutné dodržovat provozní podmínky při odlévání, temperování formy a plynulost výroby. Pracovní povrch (líc) formy by měl být po odlití každého odlitku očištěn stlačeným vzduchem, vizuálně zkontrolován a v případě problematického místa ošetřen separačním prostředkem. Proces nanášení separačního prostředku na celý líc formy se provádí před umístěním formy na stroj. Kvalita postřiku přímo určuje kvalitu povrchu budoucího odlitku a chrání formu nebo případná jádra před přímým kontaktem s roztaveným kovem. Důsledně by se mělo provádět mezižihání tvarových vložek a jader k odstranění vnitřního pnutí po odlití předepsaného počtu kusů. Nutná je také pečlivá údržba, čištění formy a chladicího systému po výrobě určitého počtu dílů. [6, 16]

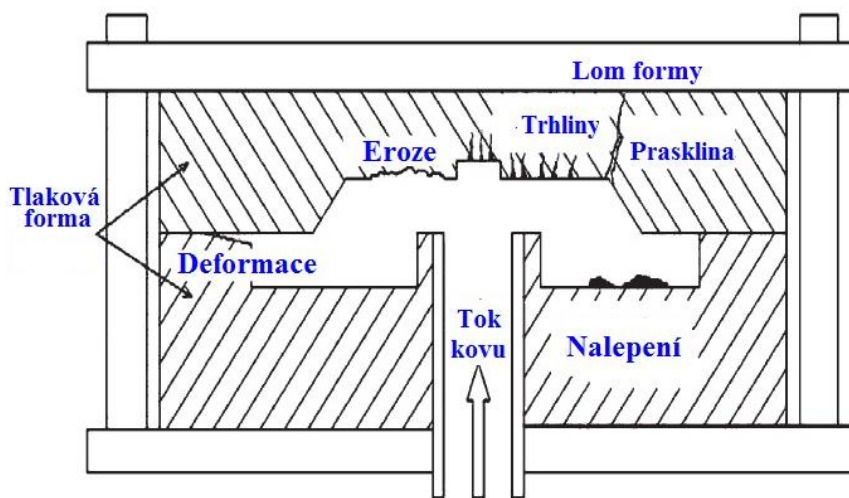
V průběhu lití jsou formy zatíženy mechanickým, tepelným a chemickým namáháním, což vede k tvorbě vad na jejím povrchu nebo případně v její struktuře. Důsledkem cyklického tepelného namáhání je vznik pnutí, jenž vzniká vzájemným působením jednotlivých vrstev stěn formy s různou teplotou. Při styku s teplým kovem se líc formy rychle ohřeje na teplotu vyšší, než je teplota ostatního materiálu formy. V této fázi se tedy objevují v povrchové vrstvě formy napětí v tlaku, protože tato vrstva má snahu zvětšit svůj objem vlivem tepelné roztažnosti, avšak ostatní chladnější části formy tomu zabraňují. Přestoupí-li napětí určitou hodnotu (mez pružnosti v tlaku), dochází k trvalé deformaci povrchové vrstvy, k jejímu upěchování. Po otevření a vytažení odlitku teplota formy rychle klesá. V návaznosti na to vzniká při lici formy tahové napětí, kdežto na vnějším povrchu formy se vyskytuje napětí tlakové. Tahové napětí na lici formy vyvolává síť trhlinek, čímž vzniká takzvané mapování povrchu líce formy. [6, 16]

Mechanické namáhání forem je způsobeno zejména proudící taveninou při plnění dutiny formy, dále smrštěním odlitků ve formě při tuhnutí a chladnutí a také následným vyjímáním odlitku z formy. Toto mechanické namáhání ovlivňuje také nanesenou vrstvu separátoru, kterou odlitek při vyjímání odírá. [9, 17]

Chemické namáhání líce formy je způsobeno vzájemnou rozpustností taveniny a materiálu formy. V případě odlévání hliníkových slitin v důsledku chemické afinity hliníku a železa dochází ke vzniku intermetalických fází, které nepříznivě ovlivňují povrch odlitku i

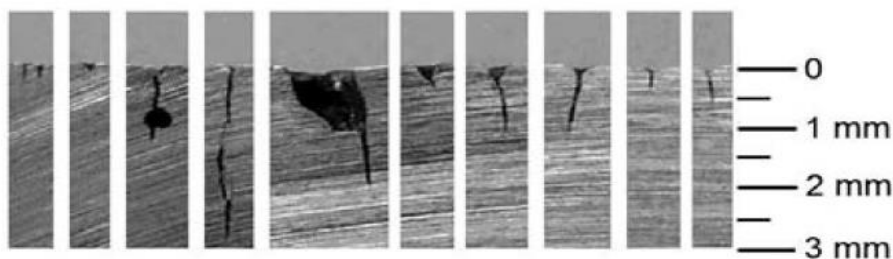
formy. Čím vyšší je teplota taveniny a teplota formy, tím rychlejší probíhá difuze a tvorba intermetalických fází. [16]

Obr. 2.19 znázorňuje nejčastější vady povrchu formy, kterými jsou trhliny, eroze způsobená tokem kovu, nalepování (letované spoje), deformace tvaru, netěsnosti formy a případně může dojít až k lomu formy. Všechny tyto povrchové vady se projeví na vzhledu a vlastnostech výsledného odlitku. [12]



Obr 2.19: *Ilustrace tlakové formy a výskytu vad [12]*

Trhliny – jak již bylo uvedeno výše, vznikají v důsledku velkých teplotních změn na lici formy během každého liciho cyklu. To způsobuje mezi povrchem a středem formy tepelná napětí, která pokud překročí mez kluzu, vedou k lokální plastické deformaci na povrchu formy a následnému vzniku povrchových trhlin. Nejprve vznikají mikrotrhlínky, do kterých v dalších cyklech vniká roztavený kov a zvětšuje je (viz obr. 2.20). Otisk těchto trhlin se pak objeví i na povrchu odlitku. [12, 13, 14]



Obr 2.20: *Metalografický výbrus tepelně namáhaných částí formy, kde vznikly trhliny [12]*

Nalepování - neboli letování je definováno jako přilnutí odlévaného materiálu k povrchu formy nebo jádra. V průběhu lícího procesu díky afinitě hliníku k železu vznikají intermetalické fáze a také roztavený hliník penetruje do trhlin na povrchu formy. Tím vznikají hliníkové nárůstky, které znehodnocují povrch formy nebo jádra a na povrchu odlitku způsobují zadřenininy. Nejčastěji se tato vada objevuje na přehřívajících se místech formy, v místech, kde proudící tavenina naráží přímo na stěnu formy nebo jádro (např. místa proti vtoku). Častým místem výskytu jsou také opravené části formy navařováním. Odolnost nalepování lze zvýšit pomocí povrchových úprav. Příklad nalepení je možné vidět na obr. 2.21. Tato místa lze očistit mechanicky nebo pomocí hydroxidu sodného. [15, 17]



Obr 2.21: *Vzorek z oceli H13 při testu nalepování [15]*

Pokud je to možné, tak se tvarové vložky formy opravují. Vady se nejprve vybrousí, popř. vyfrézují a následně navařují. Při opravách rozsáhlejších povrchových vad formy se využívá navařování metodou TIG s přídavným drátem z legované oceli. Jemnější tvary a hrany se opravují pomocí laserových mikrosvářeček. Pro zvýšení odolnosti proti nalepování nebo vymílání kovem se povrch formy u naříznutí ztvrdzuje najiskřením wolfram-karbidovými elektrodami. [1, 8]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jak již bylo uvedeno v kap. 2.4, velmi důležitým činitelem, který ovlivňuje povrchovou a také vnitřní kvalitu odlévaných dílů, je ochranný postřik líce formy. Separační nástřik se během odlévání vlivem vyjímání odlitku z líce formy mechanicky odírá. Na odolnost ochranného postřiku mechanickému poškození má vliv zejména typ postřiku, jeho tloušťka a podmínky jeho nanášení (teplota, čistota a drsnost povrchu formy).

Experimentální část této práce byla řešena v rámci spolupráce s firmou RONAL CR s.r.o. Hodnotit odolnost ochranného nástřiku mechanickému poškození přímo na nízkotlaké formě je vzhledem k velikosti jednotlivých částí formy problematické. Bylo by možné pouze vizuálně hodnotit, zda je postřik z líce formy odřen nebo nikoliv. Proto byla v rámci experimentu navržena metodika zkoušení a hodnocení odolnosti ochranného nástřiku líce formy mechanickému poškození během licího procesu pomocí zkušebních vzorků.

Ve snaze o co největší přiblížení reálným podmínkám byly materiál, příprava povrchu vzorku a podmínky aplikace ochranného postřiku provedeny ve shodě s podmínkami průmyslové výroby.

Pro experiment byly vyrobeny tři šarže vzorků s ochrannými postřiky (A, B, C), na kterých byla změřena tloušťka nanesené vrstvy a drsnost povrchu této vrstvy. Vzhledem k chybějícím informacím o chemickém složení postřiků, byly jednotlivé vzorky podrobeny liniové analýze chemického složení na rastrovacím elektronovém mikroskopu. Cílem diplomové práce bylo vypracovat metodiku hodnocení odolnosti různých typů nástřiku vůči mechanickému poškození. Odolnost proti mechanickému poškození byla zkoušena pomocí tribometru a vyhodnocena pomocí laserového konfokálního mikroskopu. Pro experiment byla nejprve použita rotační tribologie. V následujícím kroku byl u tribometru využit lineární modul. Pro co největší přiblížení k reálným podmínkám byly obě tribologické metody provedeny za pokojové teploty a teploty 400 °C.

3.1. Příprava vzorků

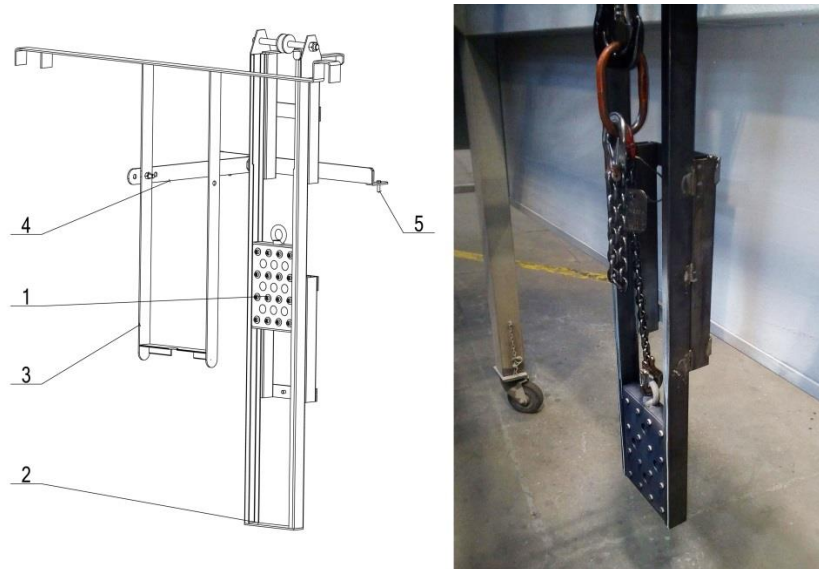
Substráty (základní materiál), na které byl aplikován ochranný prostředek, byly vyrobeny stejně jako tvarové vložky nízkotlakých forem z materiálu ČSN 19 552. Jedná se o chrom – molybden – křemík – vanadovou ocel s vysokou pevností za tepla, velmi dobrou houževnatostí a plastickými vlastnostmi za zvýšených teplot. Dále tato nástrojová ocel vykazuje velmi dobrou odolnost tepelné únavě a malou citlivost na prudké změny teploty. Je proto vhodným materiálem pro výrobu forem určených pro odlévání neželezných slitin. Její chemické složení dané normou je uvedeno v tab. 3.1.

Tab 3.1: Chemické složení ČSN 19 552 dle normy:

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
Chemické složení [%]	0,36 až 0,42	0,30 až 0,50	0,90 až 1,20	4,80 až 5,50	1,10 až 1,40	0,25 až 0,50	max. 0,030	max. 0,030

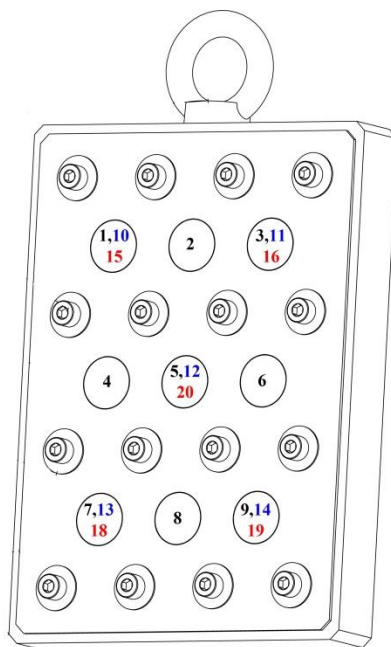
Vzhledem ke zvolenému způsobu hodnocení odolnosti ochranného postřiku na tribometru a tvaru upínače vzorků, byl zvolen kruhový tvar vzorku o průměru 30 mm.

Pro zajištění opakovatelnosti aplikace ochranného postřiku na substráty byl zkonstruován přípravek, jehož provedení je uvedeno na obr. 3.1. Celá sada vzorků je umístěna ve svém vlastním pouzdře (pozice 1). Toto pouzdro je přes tažné oko spojeno s řetězem, kterým je přes kladku zajištěn pohyb. Vertikální směr pohybu je zajištěn vedením pouzdra vzorků (pozice 2). Ustavení přípravku v rámové konstrukci je zajištěno šroubovými spoji (pozice 5). O správnou vzdálenost nanášení postřiku se stará distanční vzpěra (pozice 4), která navazuje na opěrnou konstrukci pro stříkací pistoli (pozice 3). Díky pohybu v zápěstí tak koná stříkací pistole pouze výkyvný pohyb v horizontálním směru. Aby byl experiment co nejméně ovlivněn lidským faktorem, byly všechny tři šarže nanесeny stejným pracovníkem slévárny.



Obr 3.1: Přípravek pro výrobu vzorků – výkres sestavy (vlevo), užitý přípravek (vpravo)

Do pouzdra pro přípravu sady vzorků je možné umístit až devět substrátů, které byly v pouzdře umístěny dle schématu na obr. 3.2. Příprava referenčního vzorku byla provedena ve středu pouzdra.



Obr 3.2: Umístění vzorků v pouzdře včetně čísla vzorku (postřik A, *postřik B*, *postřik C*)

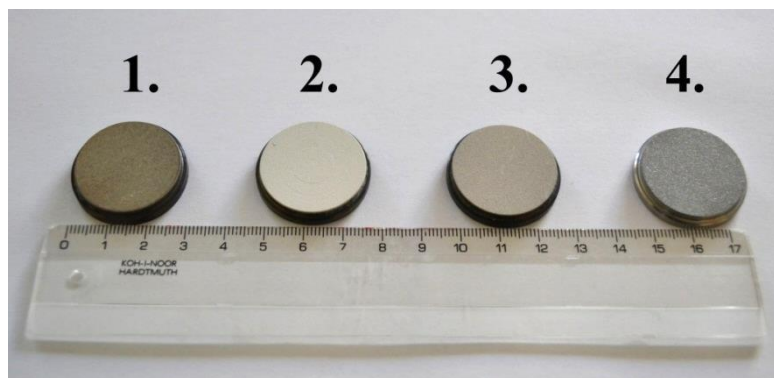
Po založení číselně označeného substrátu do pouzdra byly všechny vzorky nejprve otryskány korundem. V případě šarže č. 1 (ochranný postřík typ A) následovalo ještě tryskání povrchu suchým ledem. Pro studium drsnosti povrchu vzorku bez naneseného ochranného postříku byl využit referenční vzorek (obr. 3.3), u kterého byla pomocí laserového konfokálního mikroskopu naměřena průměrná hodnota drsnosti povrchu $S_z = 43,52 \mu\text{m}$.



Obr 3.3: *Očištěný referenční vzorek bez ochranného postříku*

Po otryskání bylo pouzdro se vzorky ohřáto na cca 200 °C. Když byl povrch substrátu důkladně připraven, bylo možné nanést ochranný postřík (šlichtu) za pomoci stříkací pistole.

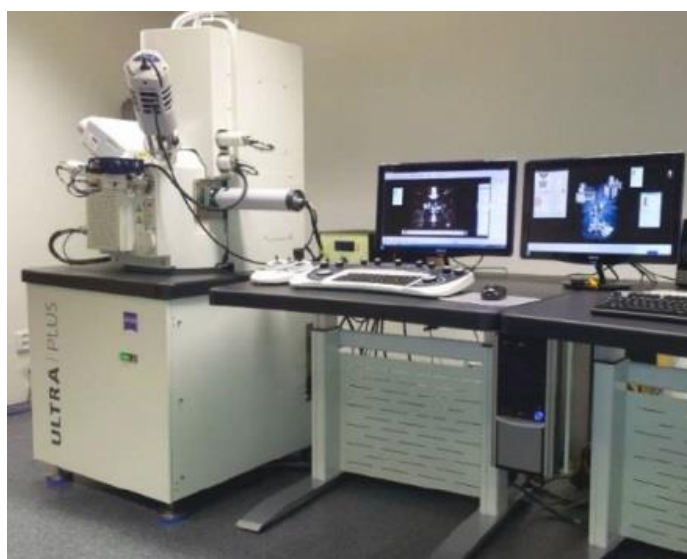
Po aplikaci ochranného postříku byly vzorky vypáleny v peci při 400 °C po dobu 3 hodin. Takto připravené vzorky byly po vychladnutí na pokojovou teplotu uloženy do přepravních schránek. Porovnání všech tří ochranných postříků a referenčního vzorku je možné vidět na obr. 3.4.



Obr 3.4: *Sada vzorků ochranných postříků (1 – postřík A, 2- postřík B, 3 – postřík C, 4- referenční vzorek)*

3.2. Chemické složení ochranných postřiků

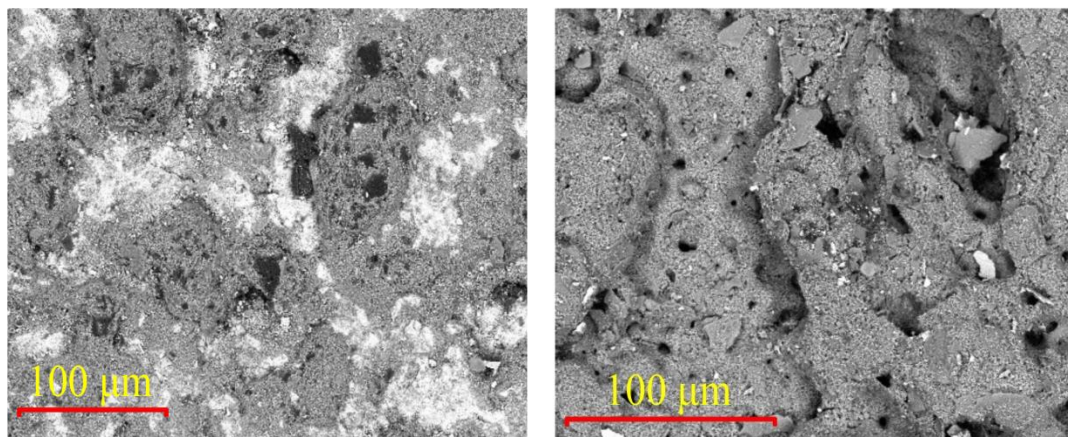
Jelikož výrobce ochranných postřiků neuvádí přesné chemické složení, bylo nutné provést chemickou analýzu nanesených vrstev. Označené vzorky ochranných postřiků byly umístěny do elektronového mikroskopu Zeiss Ultra Plus s EDS detektorem Oxford X-Max 20 (viz obr. 3.5). Zpracování dat proběhlo v programu SW AzTec. Během měření byla provedena lineární analýza chemického složení jednotlivých vzorků, jejíž výsledky v hmotnostních procentech jsou zaneseny v tab. 3.2. Snímky povrchu postřiků při zvětšení 250x a 500x jsou uvedeny na obr. 3.6 a 3.7.



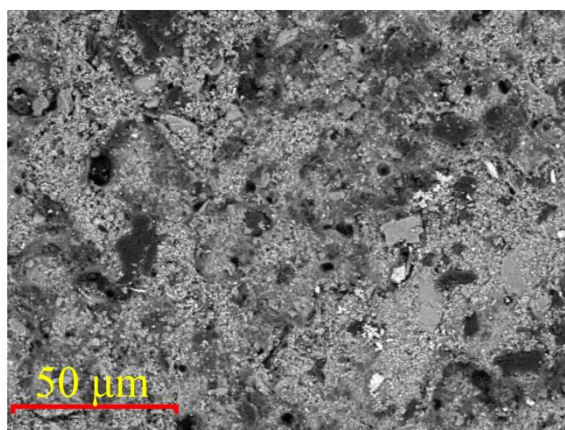
Obr 3.5: Rastrovací elektronový mikroskop Carl Zeiss ULTRA Plus

Tab 3.2: Chemické složení jednotlivých postřiků dle lineární analýzy

Hm. %	O	Si	Ti	Fe	Al	B	N	Na	Mg	K	Ca	Celkem
Postřik A	34,7	25,2	11,9	12,4	2,8	4,0	4,0	0,9	1,2	1,9	1,2	100
Postřik B	33,9	23,1	26,1	2,9	5,2	0,2	0,6	1,4	1,3	3,8	1,5	100
Postřik C	30,4	26,1	13,5	2,5	4,2	8,2	8,1	0,5	2,8	2,0	1,7	100



Obr 3.6: Snímky povrchu postříku A (vlevo) a postříku B (vpravo) při zvětšení 250x pomocí Carl Zeiss UTRA Plus

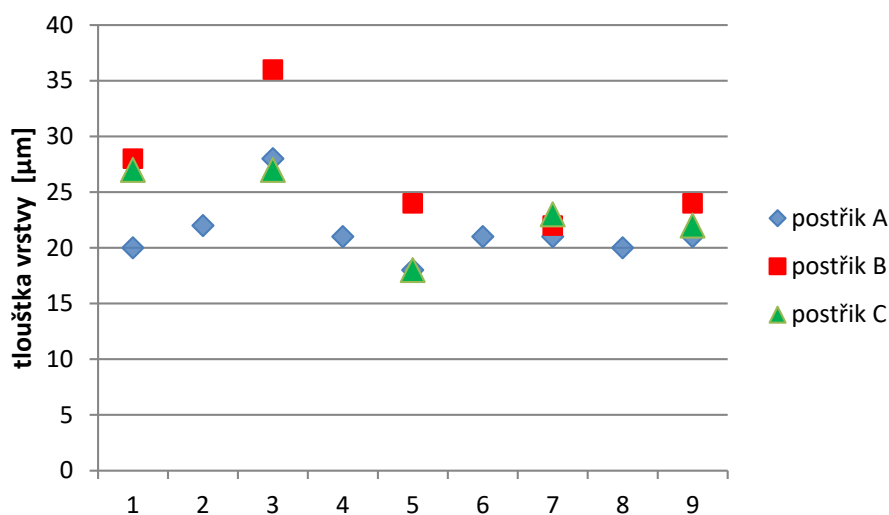


Obr 3.7: Snímek povrchu postříku C při zvětšení 500x pomocí Carl Zeiss UTRA Plus

Z výsledků chemické analýzy je zjevné, že ve složení ochranných postříků dominují zejména oxidy křemíku a titanu, což je pravděpodobně způsobeno jejich obsahem v plniči i pojivu separátoru. Zde je dobré si povšimnout až dvojnásobného obsahu titanu u postříku B. Až na výjimku u postříku A se v menší míře vyskytují oxidy železa nebo hliníku. Postříky A a C obsahují nitridy bóru, které mají za úkol snížit smáčivost Al a zvýšit žáruvzdornost postříku. Prvky jako Na, Mg, K nebo Ca poukazují na existenci slídy, talku nebo vodního skla ve složení ochranných postříků.

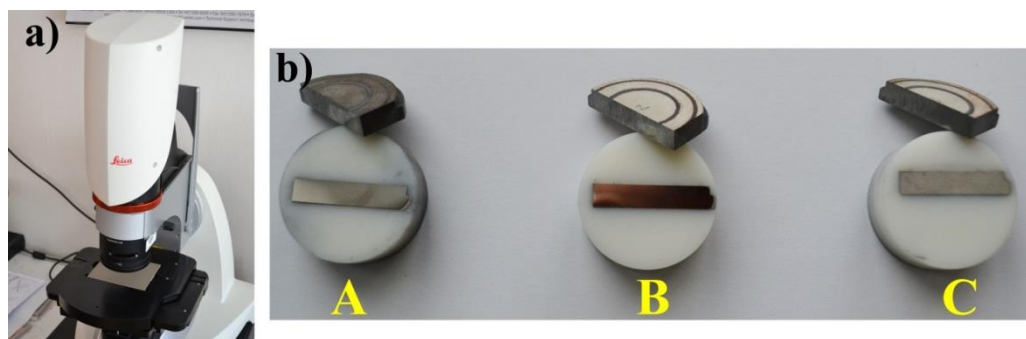
3.3. Měření tloušťky ochranného postřiku

Pro nedestructivní měření tloušťky vrstvy ochranného postřiku bylo využito přístroje PosiTector 6000, který pracuje na principu magneticko-indukční metody. Toto měření bylo provedeno zejména pro ověření vlivu umístění vzorku v přípravku. Zároveň posloužilo jako prostředek pro výběr vzorků s podobnou tloušťkou vrstvy pro následující tribologické měření. Výsledky měření tloušťky vrstvy nedestructivní metodou jsou uvedeny v příloze č. 1 a nachází se na obr. 3.8.

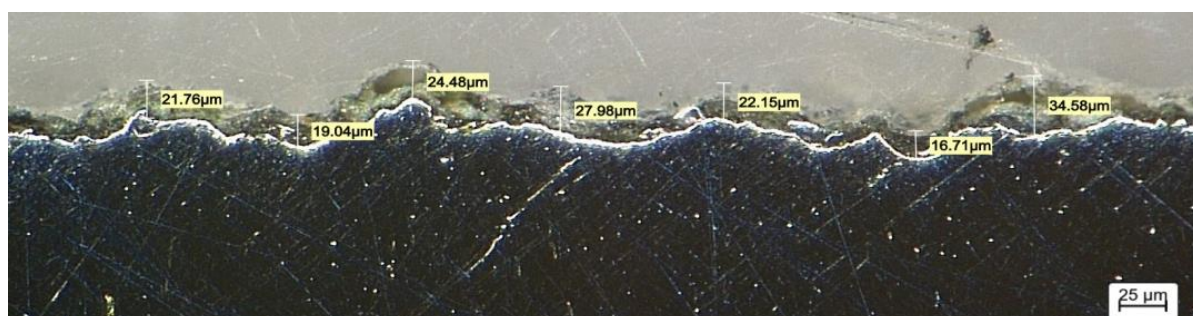


Obr 3.8: Porovnání tloušťky postřiků dle pozice v přípravku (viz obr. 3.2)

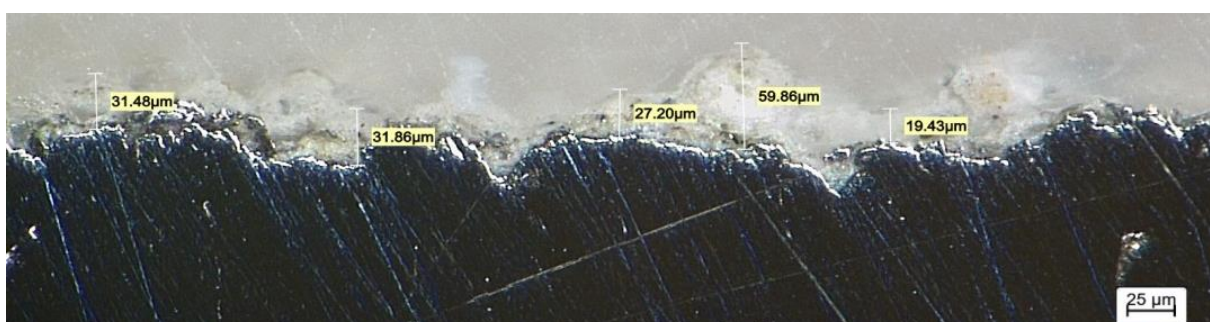
Pro ověření výsledků měřených magneticko-indukční metodou byl od každého postřiku připraven jeden metalografický vzorek (viz obr. 3.9b). Metalografická příprava vzorků proběhla standartním způsobem a vzorky byly pozorovány na digitálním mikroskopu Leica DVM6 (viz obr. 3.9a). Z výsledných snímků, jejichž příkladem jsou obr. 3.9, 3.10 a 3.11, bylo odečteno deset hodnot, které byly následně zprůměrovány a zaneseny do grafu na obr. 3.13.



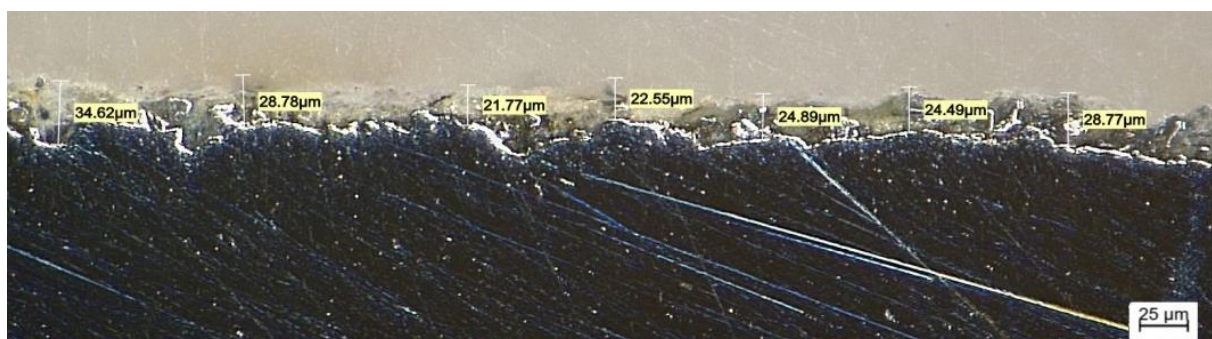
Obr 3.9: a) digitální mikroskop Leica DVM6, b) metalografické vzorky



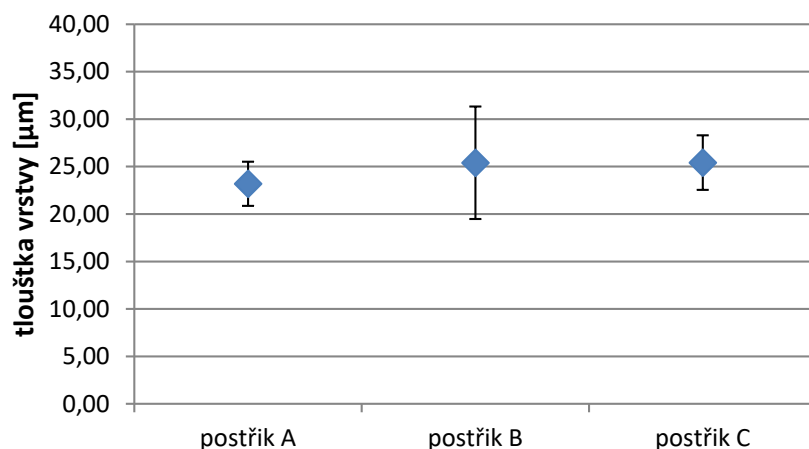
Obr 3.10: Metalografický výbrus – postřík A (vzorek 6)



Obr 3.11: Metalografický výbrus – postřík B (vzorek 10)



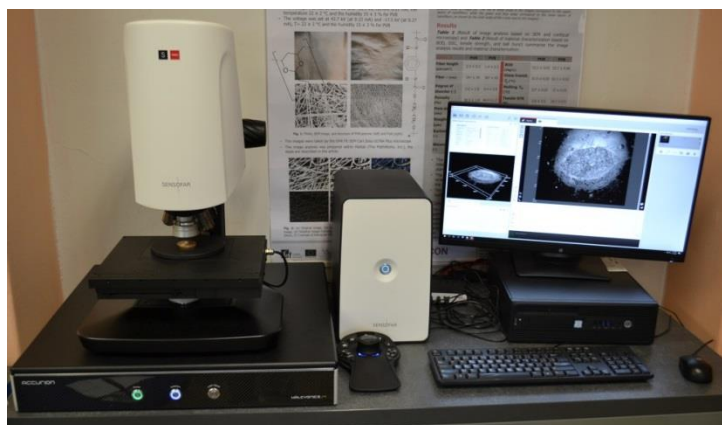
Obr 3.12: Metalografický výbrus – postřík C (vzorek 18)



Obr 3.13: *Průměrné hodnoty tloušťky postřiku z metalografického výbrusu*

3.4. Měření drsnosti povrchu ochranného postřiku

Před měřením drsnosti povrchu ochranného postřiku byly podle předchozího měření tloušťky nedestruktivní metodou vybrány tři vzorky z každé šarže s podobnou tloušťkou. Pro srovnání s drsností povrchu vzorku bez postřiku byl použit vzorek s označením REF. Na těchto vzorcích byla sledována morfologie povrchu spolu s průměrnou plošnou drsností povrchu Sz (největší výška dle ISO 25178 – výška mezi nejnižší prohlubní a nejvyšším výstupkem) na konfokálním mikroskopu SENSOFAR S Neox při dvacetinásobném zvětšení (viz obr. 3.14).



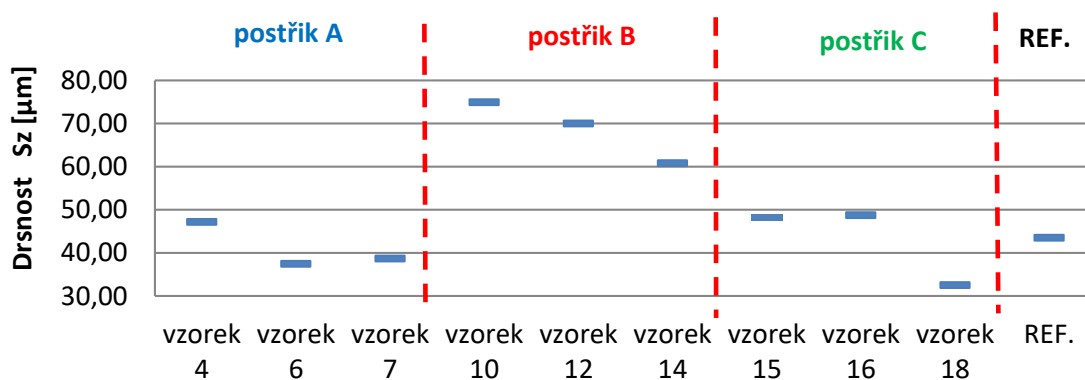
Obr 3.14: *Konfokální mikroskop SENSOFAR S Neox*

Na každém vzorku byla provedena tři měření v odlišných částech povrchu. Tyto hodnoty byly zprůměrovány, zaneseny do tab. 3.3 a znázorněny v grafu na obr. 3.15.

Tab 3.3: *Hodnoty drsnosti povrchu Sz*

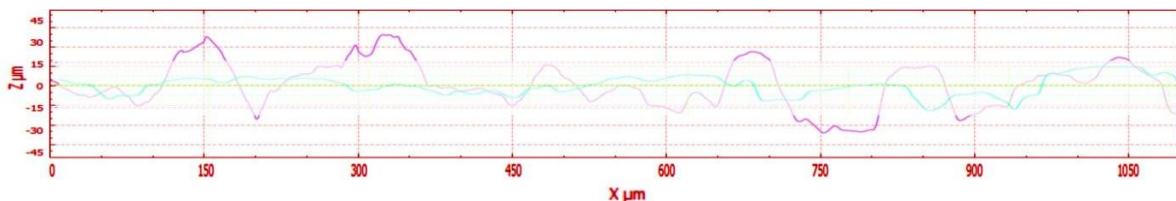
		postřik A			postřik B			postřik C		
drsnost Sz [μm]	REF.	vzorek 4	vzorek 6	vzorek 7	vzorek 10	vzorek 12	vzorek 14	vzorek 15	vzorek 16	vzorek 18
měření 1	42,6	47,8	34,5	39,3	77,9	75,4	59,2	52,5	48,1	34,2
měření 2	43,2	50,4	39,2	38,0	77,7	61,1	63,0	47,9	48,4	32,3
měření 3	44,7	43,3	38,8	38,7	69,2	73,5	60,2	44,0	49,8	31,2
PRŮMĚR	43,5	47,2	37,5	38,7	74,9	70,0	60,8	48,1	48,7	32,5
<i>SMODCH</i>	<i>0,9</i>	<i>3,0</i>	<i>2,1</i>	<i>0,5</i>	<i>4,1</i>	<i>6,3</i>	<i>1,6</i>	<i>3,5</i>	<i>0,8</i>	<i>1,2</i>

Nejnižší průměrné hodnoty drsnosti povrchu dosáhl postřik A s hodnotou 41,1 μm . Hodnoty 43,1 μm dosáhl postřik C, což je nejbližší k hodnotě drsnosti povrchu referenčního vzorku. Drsnost povrchu až o 50% vyšší vykazuje postřik B s průměrnou hodnotou 68,6 μm .



Obr 3.15: *Průměrná drsnost povrchu*

Dle výsledků měření drsnosti povrchu byly porovnány vzorky s největší a nejmenší průměrnou drsností Sz. Následně byla porovnána jejich morfologie povrchu. Oba 2D reliéfy byly zvoleny z oblasti o velikosti 850x700 μm , ze které byl po diagonále změřen profil povrchu (viz obr. 3.16).



Obr 3.16: *Porovnání morfologie (profilu povrchu) postřiku B - fialový (vzorek 10) s postřikem C – zelený (vzorek 18)*

3.5. Hodnocení odolnosti ochranného postříku mechanickým poškozením

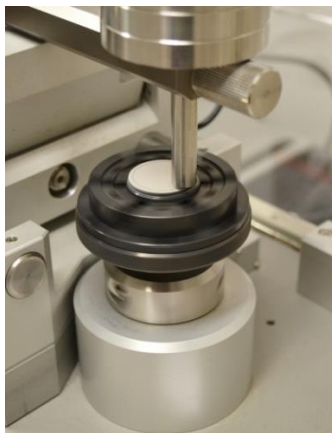
Cílem diplomové práce bylo vypracovat metodiku hodnocení odolnosti různých typů nástříku vůči mechanickému poškození. První část experimentu byla zaměřená na využití rotační tribologie (viz kapitola 3.5.1 a 3.5.2.). V následujícím kroku byl využit lineární modul u tribometru.

V první fázi hodnocení odolnosti ochranného postříku byly z každé šarže vybrány tři vzorky s podobnou tloušťkou postříku. Tyto vzorky byly nejdříve podrobeny tribologické zkoušce rotujícího vzorku za pokojové teploty, při které byla použita metoda „Ball-on-Disc“. Aby se experiment přiblížil co nejvíce reálným podmínkám mechanického opotřebení postříku na formách v provozu, byly podmínky v následujícím měření rozšířeny o teplotní zátěž vzorku při 400 °C. Tímto způsobem byl testován vždy jeden vzorek z každé šarže, který byl již testován za pokojové teploty.

Ve druhé fázi experimentu byl rotační pohyb vzorku pozměněn na pohyb lineárně vratný. V tomto režimu byly vzorky taktéž testovány za pokojové teploty a následně za zvýšené teploty 400 °C. V této fázi experimentu bylo na každém testovaném vzorku provedeno měření při 750 a 1500 cyklech. Při zkouškách za pokojové teploty byla zkouška rozšířena o pokus s 3000 cykly.

3.5.1. Rotační tribologie

Tribologické vlastnosti ochranného postříku byly naměřeny za pomoci tribometru TRB firmy Anton Paar (viz obr. 3.17), který byl vybaven svěrákem pro rotující vzorek. Pro experiment byla použita metoda „Ball-on-Disc“.



Obr 3.17: Tribometr pro suché tření

Jelikož ochranné postřiky obsahují prvky jako SiO_2 nebo TiO_2 ve vyšších koncentracích, bylo důležité použít materiál protikusu ve třecí dvojici s podobnou otěruvzdorností. Pokud by tomu tak nebylo, docházelo by k primárnímu opotřebení vzorku nebo kuličky. Proto byla během experimentu jako protikus ve třecí dvojici s ochranným postřikem použita kulička z keramického materiálu Al_2O_3 o průměru 6 mm. Takováto kulička o hustotě $3,86 \text{ g/cm}^3$ a teplotní odolnosti až 1900°C dosahuje tvrdosti blížíící se 1500 (HV10). Kulička byla během experimentu přitlačována kontaktní silou 10 N na rotující vzorek, který byl uchycen ve svěráku. Vzorek se otáčel rychlostí 60 ot/min a kulička se nacházela ve vzdálenosti 12 mm od středu rotace, tedy každý vzorek vykonal dráhu 500 m. Parametry tribologického experimentu jsou shrnuty v tab. 3.4.

Tab 3.4: Parametry tribologické zkoušky metodou „Ball-on-Disc”

materiál kuličky	Al_2O_3
materiál substrátu	ČSN 19 552
zatížení	10 N
průměr kuličky	6 mm
rychlost otáčení	60 ot/min
ujetá dráha	500 m
teplota vzduchu	22°C

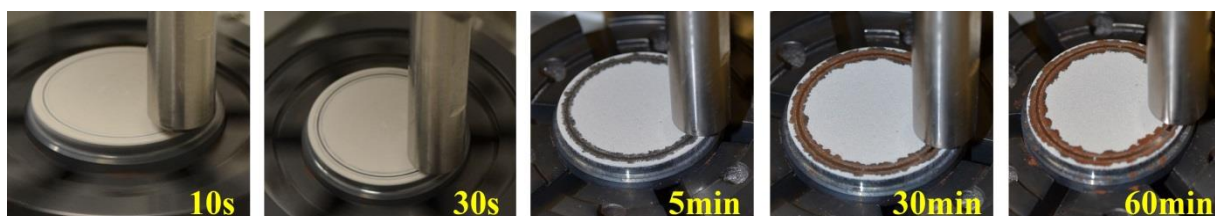
Jak se jednotlivé ochranné postřiky chovaly během tribologického experimentu, je možné vidět na obr. 3.18, 3.19 a 3.20. Vzhled opotřebení byl vždy zaznamenán v čase 10 vteřin, 30 vteřin, 5 minut, 30 minut a 60 minut od začátku experimentu. Po ukončení experimentu byl vzorek vyjmut ze svěráku a došlo k ručnímu odstranění opotřebovaného materiálu ze vzorku. Stejně tak bylo nutné tento materiál odstranit i z třecí kuličky, což bylo provedeno za pomoci vaty s etylalkoholem 96%.



Obr 3.18: *Vzhled opotřebení během tribologického experimentu – postřik A*

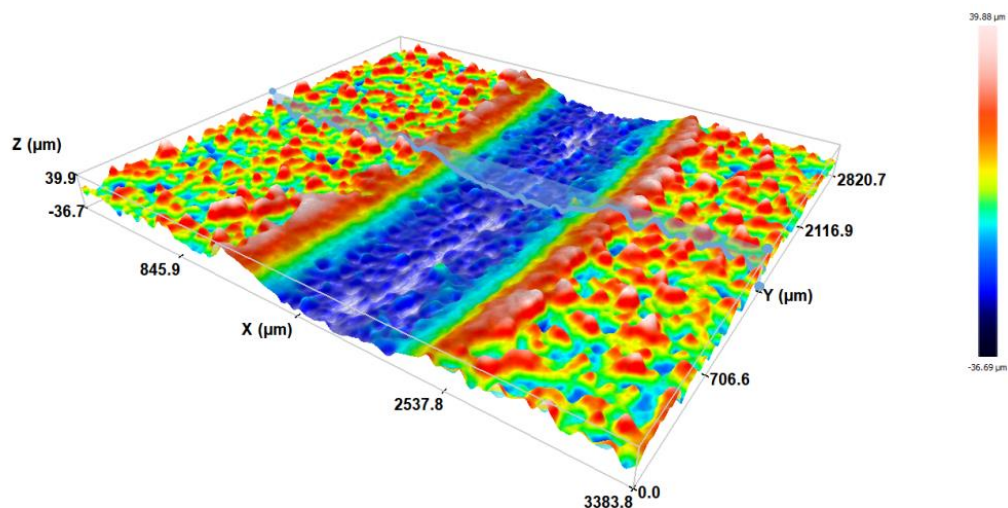


Obr 3.19: *Vzhled opotřebení během tribologického experimentu – postřik B*



Obr 3.20: *Vzhled opotřebení během tribologického experimentu – postřik C*

Vyhodnocení opotřebení proběhlo na konfokálním mikroskopu SENSOFAR S Neox se pětinašobným zvětšením, kde byla sledována hloubka a šířka opotřebení po tribologické zkoušce (viz obr. 3.21). Hodnocení opotřebení bylo sledováno na 4 místech vzniklého profilu kolmo na sebe.



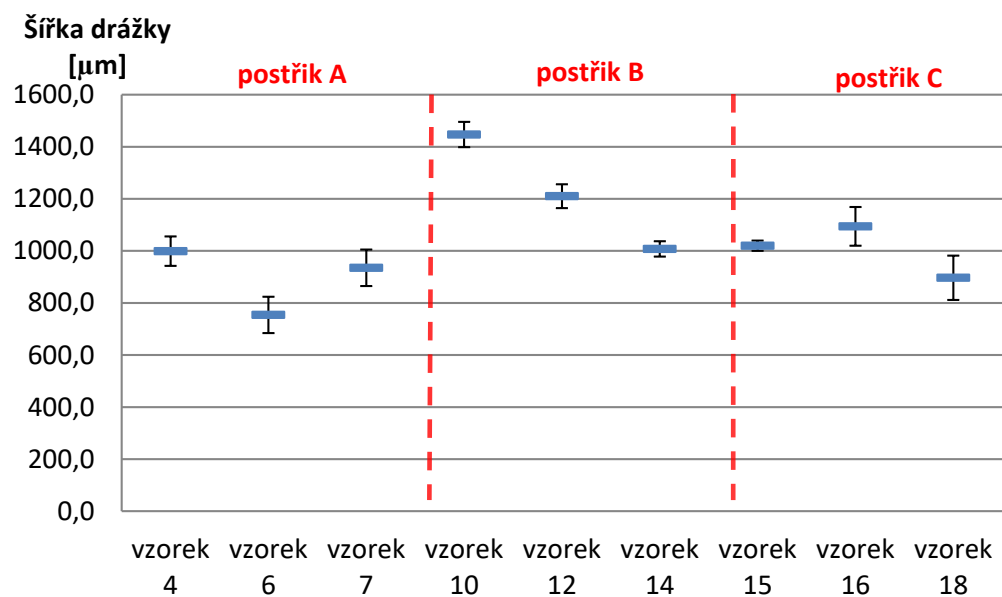
Obr 3.21: Opatřebení povrchu u vzorku 10 (postřik B)

Naměřené hodnoty šířky a hloubky profilu jsou uvedeny v tabulce 3.5 a 3.6 a znázorněny na grafech, které se nachází na obr. 3.22 a 3.23.

Tab 3.5: Šířka opotřebené vrstvy v $[\mu\text{m}]$ po ujeté dráze 500 m

	postřik A			postřik B			postřik C		
šířka $[\mu\text{m}]$	vzorek 4	vzorek 6	vzorek 7	vzorek 10	vzorek 12	vzorek 14	vzorek 15	vzorek 16	vzorek 18
měření 1	1084,7	858,4	880,5	1371,9	1244,8	979,8	1047,5	1196,5	1040,5
měření 2	960,5	679,0	1051,6	1507,0	1233,7	1032,2	1025,4	1011,6	817,0
měření 3	1013,2	703,9	927,5	1446,2	1231,0	1041,1	1014,4	1036,5	865,4
měření 4	938,0	775,8	880,5	1462,9	1131,7	977,3	992,4	1133,1	864,0
PRŮMĚR	999,1	754,3	935,0	1447,0	1210,3	1007,6	1019,9	1094,4	896,7
<i>SMODCH</i>	56,5	69,9	70,0	48,7	45,7	29,2	19,9	74,4	85,3

Nejmenší průměrné šířky drážky dosáhl postřik A s hodnotou 896,1 μm . Šířka postřiku C se v průměru pohybovala okolo hodnoty 1003,7 μm . Nejširší drážku vytvořila kulička v postřiku B s průměrnou hodnotou 1335,7 μm .

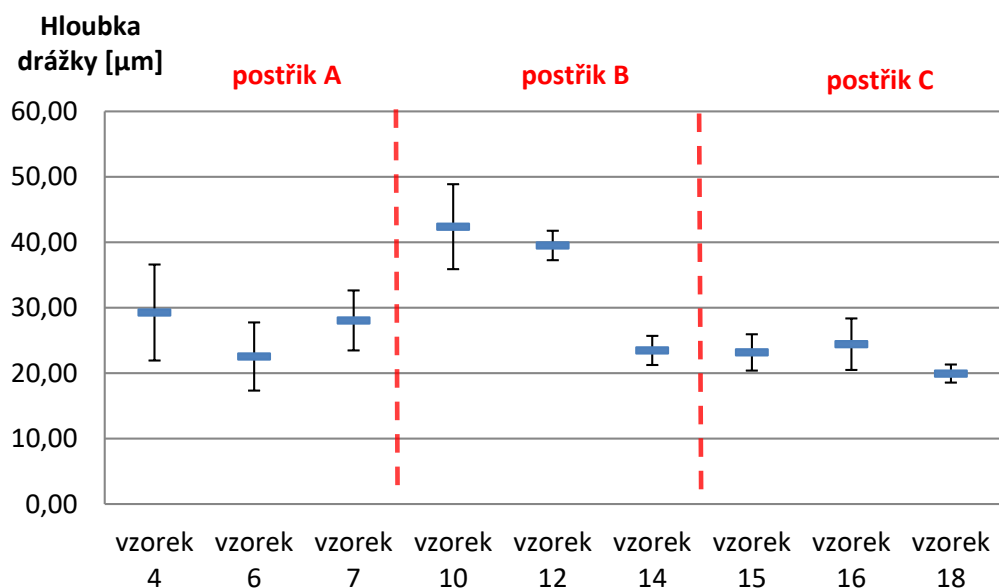


Obr 3.22: Šířka opotřebení profilu

Tab 3.6: Hloubka opotřebené vrstvy v [μm] po ujeté dráze 500 m

	postřik A			postřik B			postřik C		
hloubka [μm]	vzorek 4	vzorek 6	vzorek 7	vzorek 10	vzorek 12	vzorek 14	vzorek 15	vzorek 16	vzorek 18
měření 1	40,4	28,2	31,7	35,7	39,0	25,3	20,8	26,6	19,1
měření 2	29,1	27,2	32,7	48,4	41,3	25,0	20,6	23,1	19,8
měření 3	27,6	16,4	26,7	49,3	36,0	19,7	27,4	18,8	18,7
měření 4	19,9	18,4	21,1	36,1	41,7	23,9	24,0	29,3	22,2
PRŮMĚR	29,3	22,5	28,0	42,4	39,5	23,5	23,2	24,4	19,9
<i>SMODCH</i>	7,3	5,2	4,6	6,5	2,3	2,2	2,8	3,9	1,4

Nejmenší průměrné hloubky drážky dosáhl postřik C s hodnotou 22,5 μm. Hloubka drážky v postřiku A se v průměru pohybovala okolo hodnoty 26,6 μm. Nejhlubší drážku vytvořila kulička v postřiku B s průměrnou hodnotou 35,2 μm.



Obr 3.23: *Hloubka opotřebení profilu*

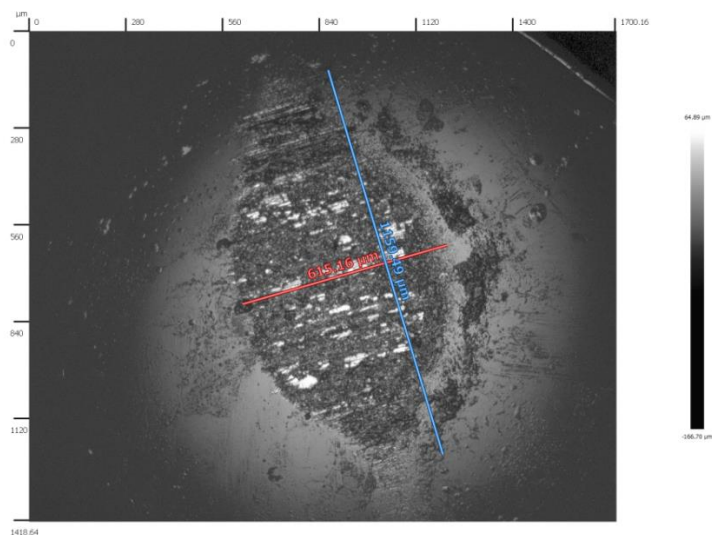
Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, důležitým parametrem je opotřebení protikusu – kuličky. Bylo proto potřebné na konfokálním mikroskopu SENSOFAR S Neox vytvořit snímky opotřebení kuličky (viz obr 3.24), ze kterých byla odečtena délka a šířka opotřebení a dle vzorce (3) vypočítán objem opotřebení kuličky. Hodnoty opotřebení kuličky jsou uvedeny v příloze č. 2 a graficky jsou zpracovány na obr. 3.25.

$$V_{pin} = \frac{\pi A^3 B}{32D} \quad (3)$$

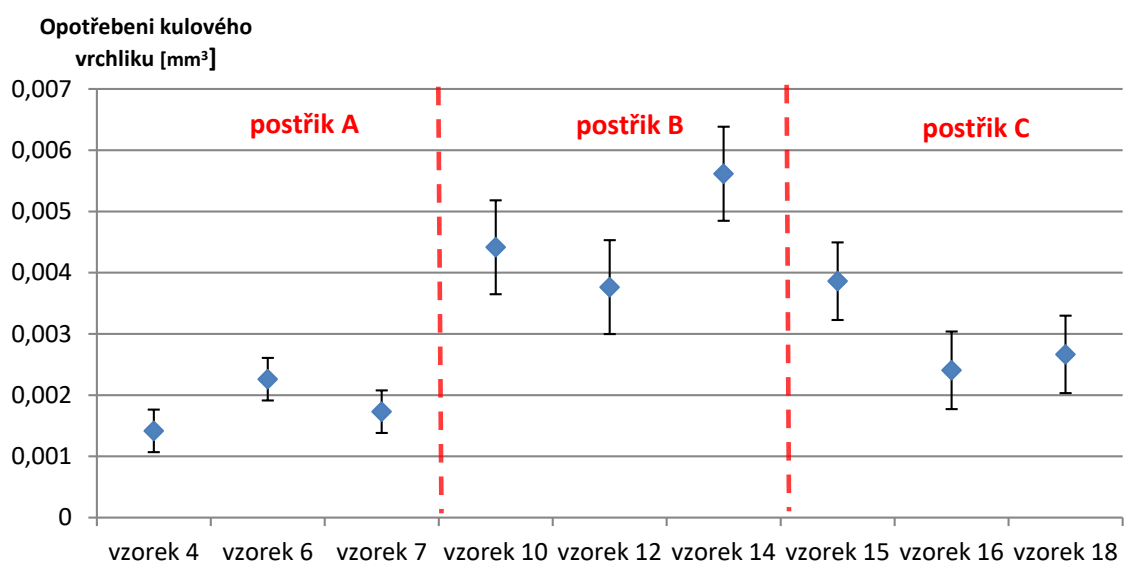
kde značí: A – průměr kuličky uprostřed opotřebené plochy;

B – průměr kuličky kolmý na rozměr A;

D – průměr kuličky.



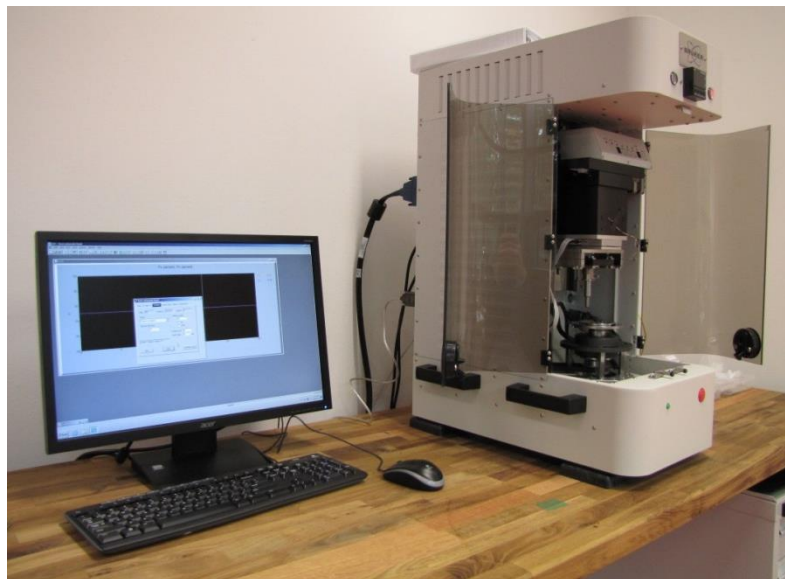
Obr 3.24: *Opotřebení kuličky u vzorku 10*



Obr 3.25: *Opotřebení kulového vrchliku kuličky – rotační tribologie*

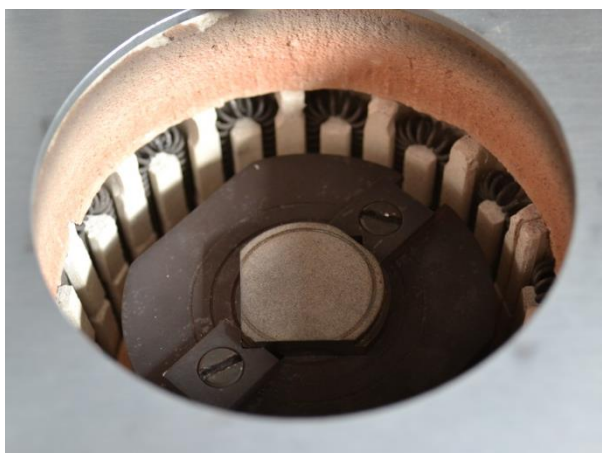
3.5.2. Vysokoteplotní rotační tribologie

Tribologické vlastnosti ochranného postřiku za zvýšené teploty byly naměřeny pomocí multifunkčního tribometru Bruker CETR UMI Multi-Specimen Test System (viz obr. 3.26), který byl osazen teplotní komorou se schopností ohřevu vzorku až do 1000 °C.



Obr 3.26: Bruker *CETR UMI Multi-Specimen Test System*

Jelikož tento stroj disponuje jiným tvarem upínacího prvku pro vzorek, bylo nutné na přesné pile upravit tvar vzorku (viz obr. 3.27). Takovýto vzorek již bylo možné upevnit do přístroje a spustit první fázi rotační tribologie se zahříváním vzorku na teplotu 400 °C.



Obr 3.27: *Vzorek před testem upnutý v environmentální komoře*

V momentě, kdy teplota zkoumaného vzorku dosáhla v komoře 400 °C, byl spuštěn tribologický experiment s parametry, které jsou uvedeny v tab. 3.7. S ohledem na předchozí test za běžné teploty a úpravu vzorku bylo nutné upravit polohu kuličky od středu rotace na 8 mm, čím došlo i ke zkrácení ujeté dráhy.

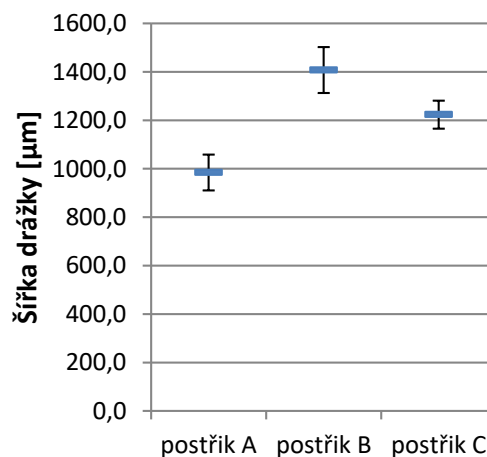
Tab 3.7: *Parametry tribologické zkoušky za zvýšené teploty*

materiál kuličky	Al ₂ O ₃
materiál substrátu	ČSN 19 552
zatížení	10 N
průměr kuličky	6 mm
rychlost otáčení	60 ot/min
ujetá dráha	180 m
teplota vzorku	400 °C

Pro hodnocení opotřebení byl stejně jako u zkoušky za pokojové teploty použit konfokálním mikroskopu SENSOFAR S Neox se pětinasobným zvětšením, kde byla sledována hloubka a šířka opotřeбенé drážky. Opotřebení bylo sledováno na 4 místech vzniklého profilu kolmo na sebe. Výsledky měření zanesené do tab. 3.8 a 3.9 je možné vidět na obr. 3.28 a 3.29.

Tab 3.8: *Šířka opotřeбенé vrstvy v [μm] po ujeté dráze 180 m*

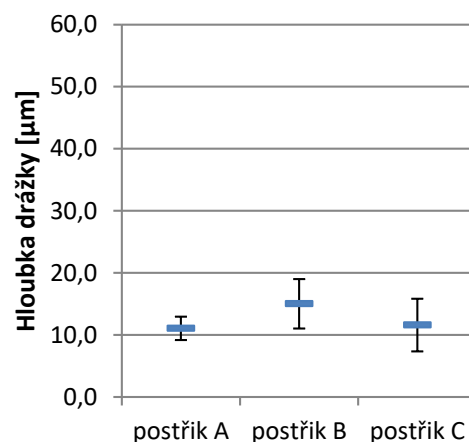
	postřik A	postřik B	postřik C
šířka [μm] při T=400°C	vzorek 6	vzorek 10	vzorek 18
měření 1	1017,5	1340,0	1278,9
měření 2	1004,7	1288,9	1283,3
měření 3	860,0	1503,2	1163,2
měření 4	1055,5	1497,3	1167,8
PRŮMĚR	984,4	1407,4	1223,3
<i>SMODCH</i>	74,2	94,7	57,8



Obr 3.28: *Šířka opotřeбенí profilu*

Tab 3.9: *Hloubka opotřebené vrstvy v [μm] po ujeté dráze 180 m*

	postřik A	postřik B	postřik C
hloubka [μm] při T=400°C	vzorek 6	vzorek 10	vzorek 18
měření 1	10,5	21,4	16,2
měření 2	14,0	12,1	15,5
měření 3	10,8	11,2	7,0
měření 4	8,9	15,3	7,8
PRŮMĚR	11,1	15,0	11,6
<i>SMODCH</i>	1,9	4,0	4,2



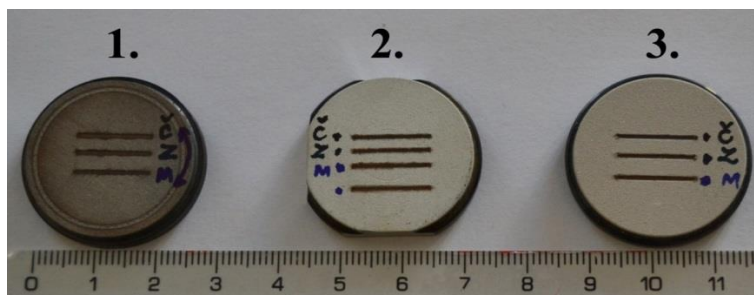
Obr 3.29: *Hloubka opotřebení profilu*

Při porovnání výsledků měření hloubky a šířky opotřebené drážky s opotřebením kuličky se objevily logické nesrovnalosti v opotřebení třecí dvojice. Dle zkušeností obsluhy tribometru by nejméně opotřebený postřik (postřik s nejmenší hloubkou a šířkou drážky – postřiky A a C) měl zanechat největší opotřebení protikusů – kuličky. Nicméně k tomuto jevu u měření při rotační zkoušce na tribometru nedošlo. Z tohoto důvodu byl v druhé fázi měření mechanického opotřebení využit lineární modul.

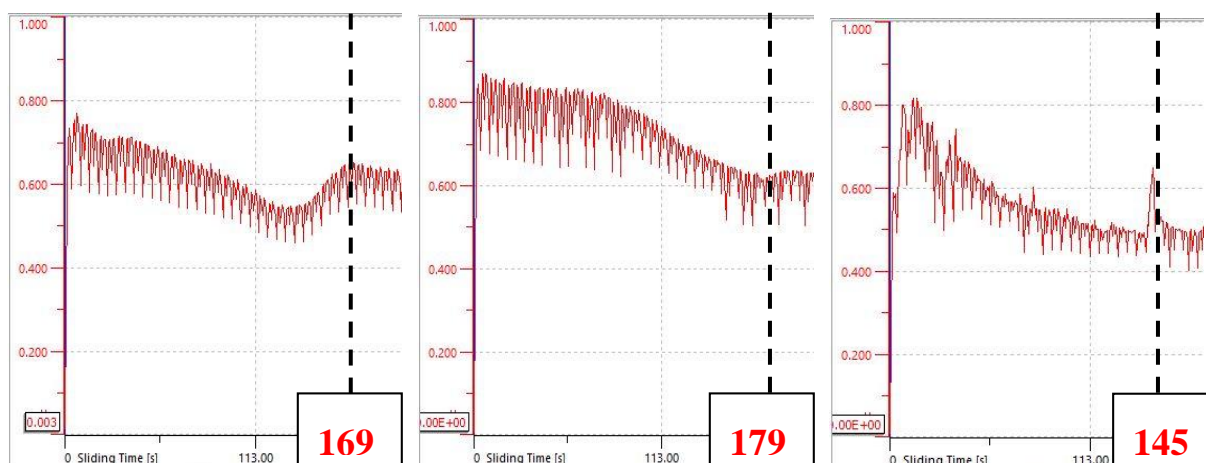
3.5.3. Lineární tribologie

Tribologické vlastnosti ochranného postřiku při lineárním pohybu byly naměřeny za pomoci tribometru TRB firmy Anton Paar. Pomocí přípravku, který je součástí výbavy přístroje, bylo možné rotační pohyb upínače vzorků převést na pohyb přímočarý vratný. Každý vzorek (viz obr. 3.30), který byl součástí experimentu, byl zatížen 10 N při 750 cyklech, 1500 cyklech a na závěr při 3000 cyklech, přičemž pojmem „cyklus“ je míněn přímočarý vratný pohyb vzorku zpět do startovní úvrati. Protikusem ve třecí dvojici byla stejně jako u rotační tribologie kulička o průměru 6 mm z materiálu Al₂O₃. Experiment probíhal za pokojové teploty 22 °C. Vyhodnocení hodnot získaných při experimentu proběhlo

v softwaru, který je součástí tribometru TRB a umožňuje zpracování dat přímo na přístroji. Tímto způsobem byl vyhodnocen koeficient tření při jednotlivých testech, resp. počet cyklů, kdy kulička přišla do kontaktu se substrátem a změnil se tak součinitel tření. Takovéto srovnání je vidět na obr. 3.31.

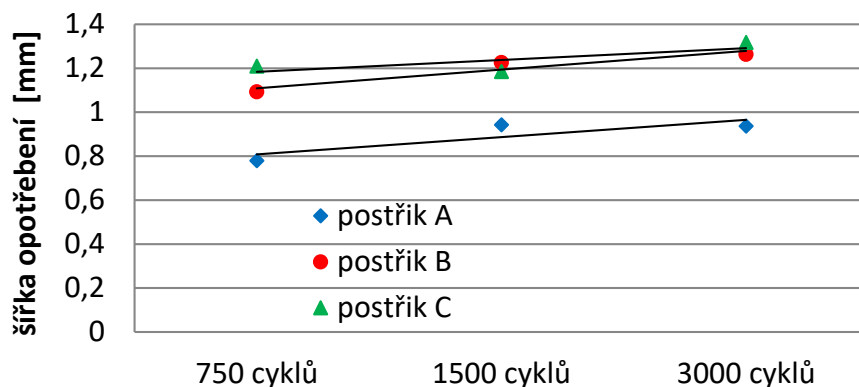


Obr 3.30: Vzorky postřiků po experimentu lineární tribologie (1 – vzorek 8 – postřik A, 2 – vzorek 13 – postřik B, 3 – vzorek 19 – postřik C)

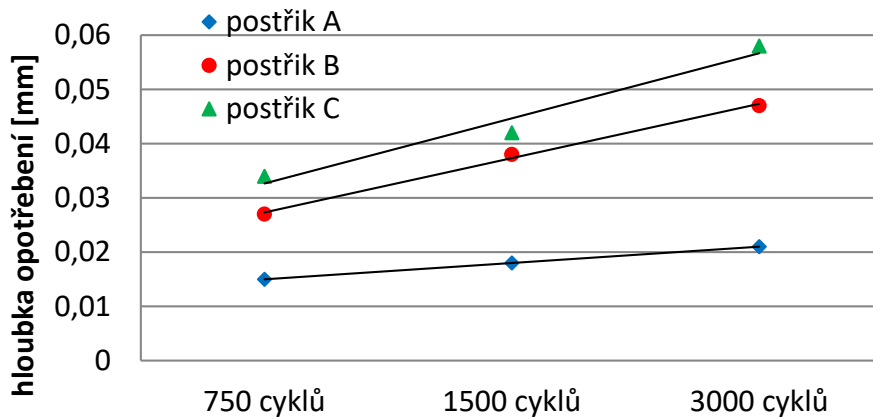


Obr 3.31: Počet cyklů při porušení ochranného postřiku (postřik A, postřik B, postřik C)

Na konfokálním mikroskopu SENSOFAR S Neox byla opět hodnocena hloubka a šířka opotřebené drážky, které vznikly při jednotlivých cyklech. Hodnoty opotřebení drážky jsou v grafech, které je možné vidět na obr. 3.32 a 3.33. Hodnoty z těchto grafů je možné najít v příloze č. 3, respektive č. 4.

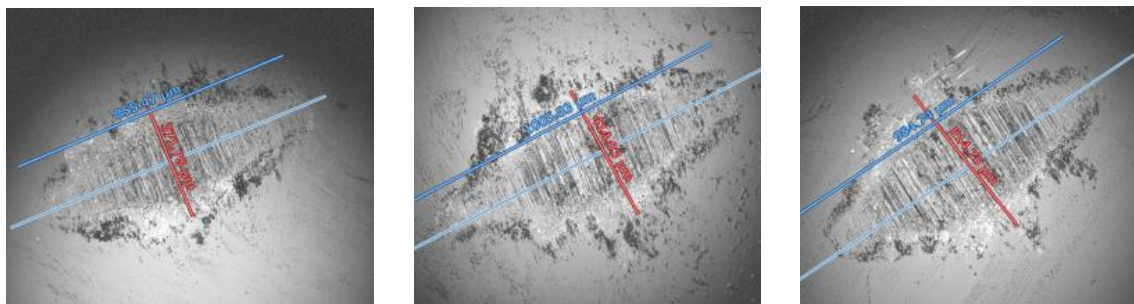


Obr 3.32: Šířka opotřebení profilu při lineární tribologii

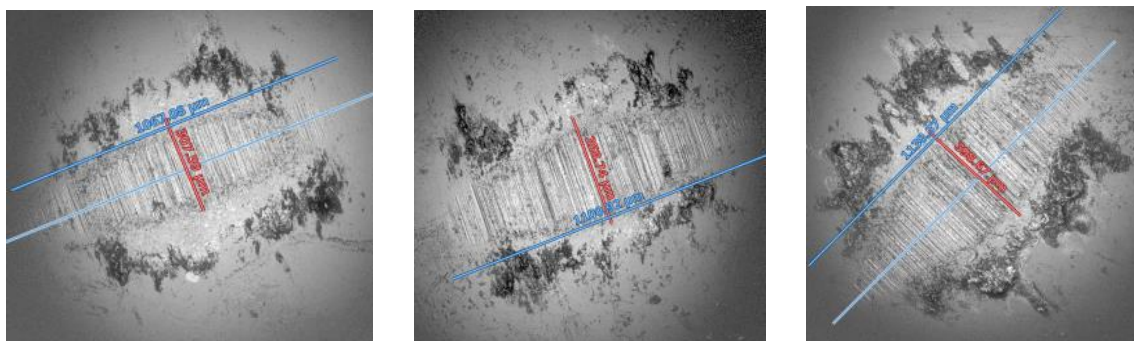


Obr 3.33: Hloubka opotřebení profile při lineární tribologii

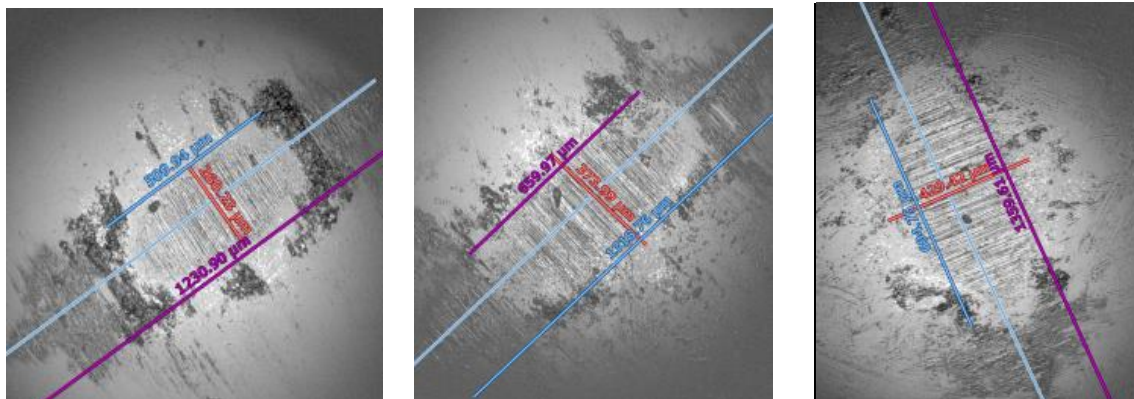
Stejně jako u rotační tribologie bylo nutné na konfokálním mikroskopu SENSOFAR S Neox vyhodnotit opotřebení protikusu – kuličky. Hodnoty opotřebení kuličky dostupné v příloze č. 5 jsou zaneseny v grafu na obr. 3.37. Opotřebení kuličky s navyšujícím se počtem cyklů pro všechny tři postřiky je možné vidět na obr. 3.34 až 3.36.



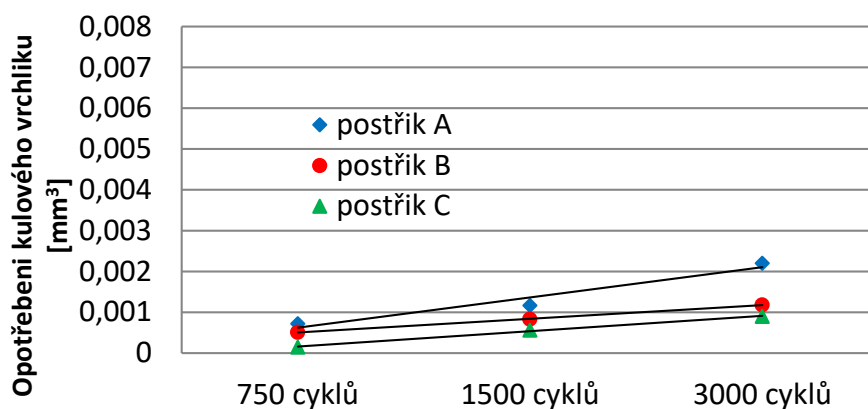
Obr 3.34: *Opotřebení kuličky – postřik A (750 cyklů, 1500 cyklů, 3000 cyklů)*



Obr 3.35: *Opotřebení kuličky – postřik B (750 cyklů, 1500 cyklů, 3000 cyklů)*



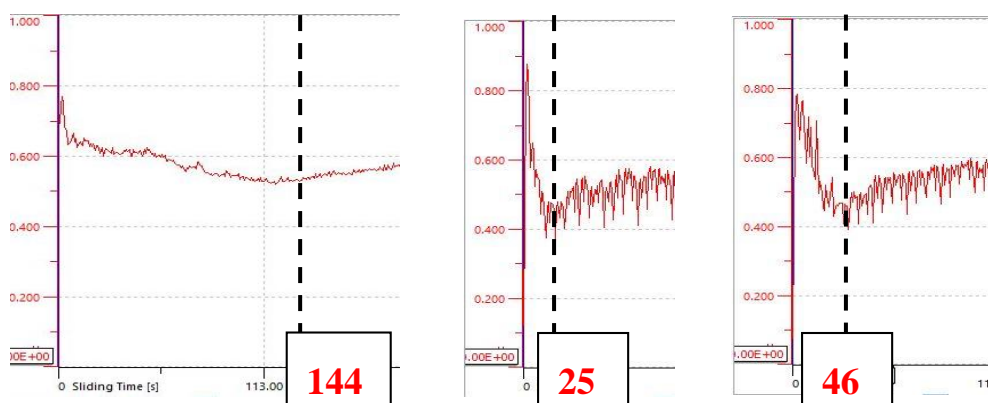
Obr 3.36: *Opotřebení kuličky – postřik C (750 cyklů, 1500 cyklů, 3000 cyklů)*



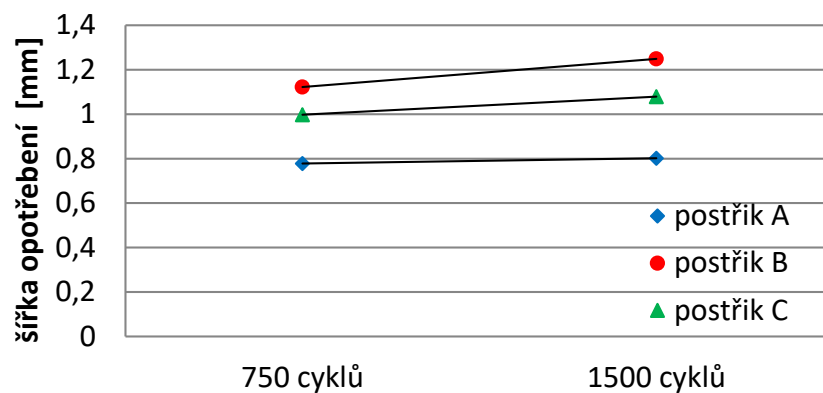
Obr 3.37: Opotřebení kulového vrchliku kuličky – lineární tribologie

3.5.4. Vysokoteplotní lineární tribologie

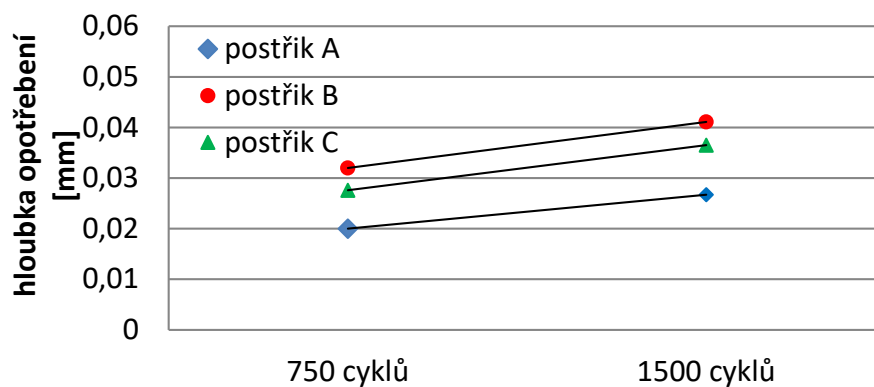
Experiment lineární tribologie za zvýšené teploty probíhal na identickém stroji jako zkouška za teploty pokojové. Pouze upínací prostor pro vzorky byl vybaven topným tělesem, které zajistilo konstantní ohřev vzorku na 400 °C, čímž se stejně jako u rotační tribologie experiment snažil přiblížit reálným podmínkám ve formě. Vzhledem k výsledkům z lineární tribologie při 22 °C byla provedena zkouška pouze při 750 a 1500 cyklech. Vzorek byl zatěžován 10 N kuličkou z Al_2O_3 o průměru 6 mm. Poté co vzorky vychladly na pokojovou teplotu, byla na konfokálním mikroskopu vyhodnocena šířka (příloha č. 6) a hloubka drážky (příloha č. 7). Výsledky je možné vidět na obr. 3.39 a 3.40. Během experimentu za zvýšené teploty byl stejně jako u předchozí zkoušky sledován moment, kdy dojde k prodření ochranného postříku a výsledky je možné vidět na obr. 3.38.



Obr 3.38: Počet cyklů při porušení ochranného postříku – při $T=400\text{ °C}$ (postřik A, postřik B, postřik C)

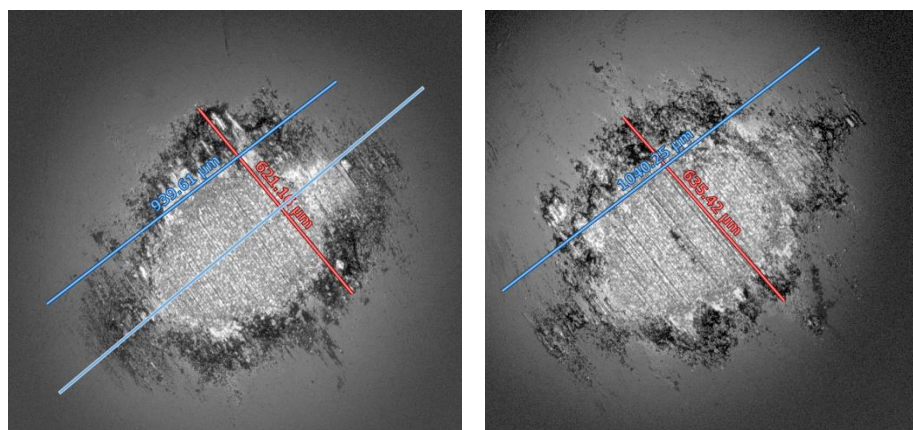


Obr 3.39: Šířka opotřebení profilu při vysokoteplotní lineární tribologii

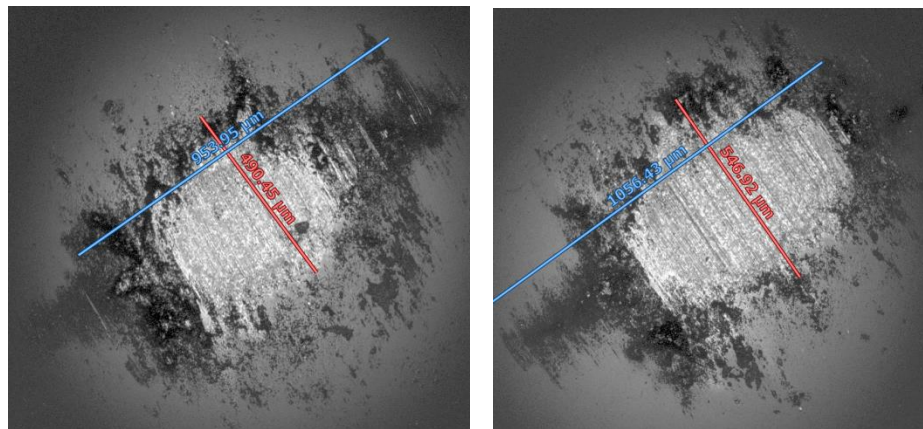


Obr 3.40: Hloubka opotřebení profilu při vysokoteplotní lineární tribologii

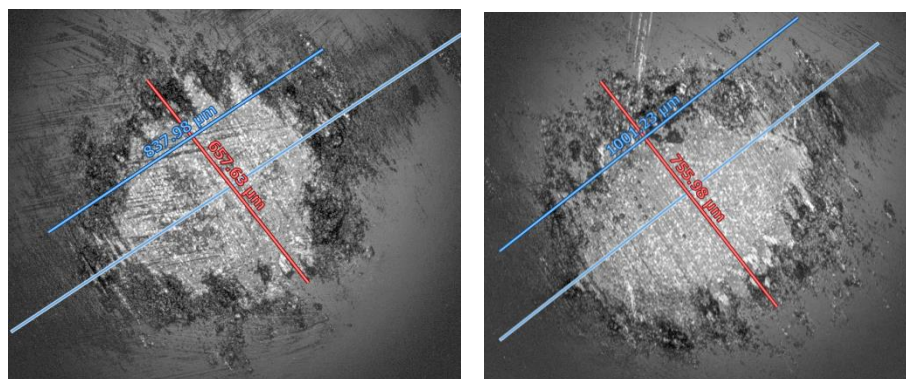
Opotřebení kuličky působící proti vzorkům je možné vidět obr. 3.41 až 3.43. Hodnoty opotřebení kuličky dostupné v příloze č. 8 jsou zaneseny do grafu na obr 3.44.



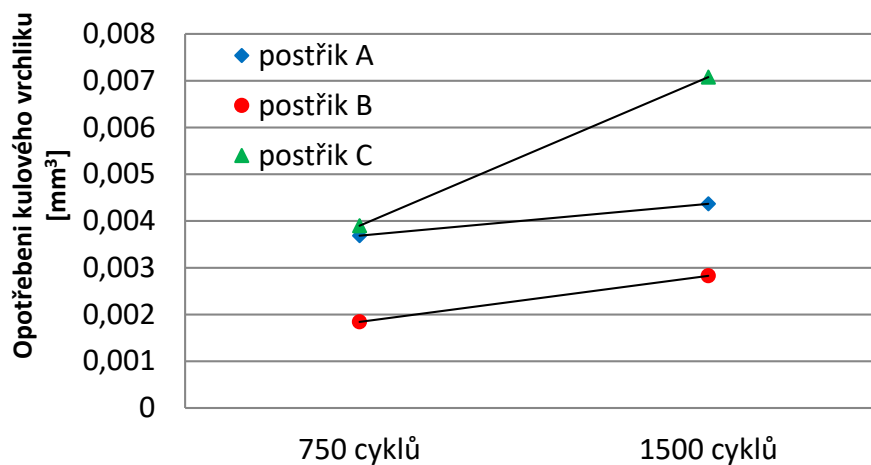
Obr 3.41: Opotřebení kuličky při 400 °C – postřik A (750 cyklů, 1500 cyklů)



Obr 3.42: *Opotřebení kuličky při 400 °C – postřik B (750 cyklů, 1500 cyklů)*



Obr 3.43: *Opotřebení kuličky při 400 °C – postřik C (750 cyklů, 1500 cyklů)*



Obr 3.44: *Opotřebení kulového vrchlíku kuličky – lineární tribologie při 400 °C*

4. DISKUZE VÝSLEDKU

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout metodiku zkoušení a hodnocení odolnosti postřiku líce formy mechanickému poškození během licího procesu. V rámci spolupráce s firmou RONAL CR s.r.o. byly provedeny experimenty zaměřené na hodnocení trvanlivosti postřiku. Jelikož by bylo vzhledem k velikosti jednotlivých částí formy poněkud problematické hodnotit mechanické poškození ochranného postřiku přímo na formě, byla navržena metodika zkoušení a hodnocení pomocí zkušebních vzorků. Ve snaze co nejvíce napodobit reálné podmínky ve výrobě byl materiál, příprava povrchu vzorku a podmínky aplikace ochranného postřiku provedeny ve shodě s podmínkami průmyslové výroby.

Pro komplexnost řešení bylo hodnoceno chemické složení jednotlivých postřiků, tloušťka vrstvy a drsnost povrchu postřiku. Na základě provedených měření bylo možné potom hodnotit odolnost jednotlivých postřiků proti mechanickému opotřebení a jejich případnou vhodnost pro použití ve výrobě.

Z výsledků *chemické analýzy* postřiku, která je uvedena v tab. 3.2, je možné vidět, že dominantními prvky ve složení ochranných postřiků jsou kyslík, křemík, železo a titan, což poukazuje na obsah oxidů těchto prvků (SiO_2 , TiO_2). Křemík dohromady s hořčíkem, hliníkem a kyslíkem poukazuje na obsah talku a slídy ve složení postřiků. U těchto prvků je důležitá jejich tepelná vodivost, tvar a velikost zrn, jelikož plní roli plniče ochranných postřiků a mohou mít vliv na drsnost nebo tloušťku postřiků. Výskyt hořčíku a sodíku v kombinaci s křemíkem odkazuje na obsah vodního skla (Mg_2SiO_3) nebo Na_2O , jenž plní funkci pojiva. Zvláštní pozornost by měla být věnována obsahu nitridu bóru, který se nachází v postřiku A a C. Ten má za úkol zvýšit žáruvzdornost ochranného postřiku a mohl by tak mít vliv na mechanické opotřebení postřiku.

Dle naměřených hodnot *tloušťky postřiků* nedestruktivní magneticko-indukční metodou (viz obr. 3.8) a snímků z metalografických vzorků (viz obr. 3.10 - 3.12) lze konstatovat, že postřik A vytváří nejvíce homogenní vrstvu s nejmenší změnou tloušťky a nejlépe ukládá částice v ploše. Z obr. 3.10 lze vysledovat tendenci postřiku dobře kopírovat povrch substrátu. Postřik C dobře vyplňuje „propadliny“ na povrchu substrátu (viz obr. 3.12) a vykazuje podobnou změnu tloušťky jako postřik A. Největší rozdíly ve změně tloušťky byly

naměřeny u postřiku B. Dle obr. 3.11 tento postřik dobře zaplňuje „propadliny“, nicméně má také tendenci k tvorbě shluků. Tyto shluky pak tvoří osamělé „nástavby“, které zvyšují necelistvost postřiku a zvyšují i jeho drsnost povrchu. To je také důvodem, proč byly u postřiku B naměřeny tloušťky postřiku s největším rozptylem (viz obr. 3.13). Zároveň lze také na základě výsledků měření tloušťky postřiku A (obr. 3.8) konstatovat, že umístění vzorku v přípravku nemělo výrazný vliv. Dle výsledků měření tloušťky magneticko-indukční metodou byly pro následující experimenty vybrány tři vzorky s podobnou tloušťkou postřiku od každé šarže.

Drsnost povrchu jednotlivých postřiků bylo nutné vztáhnout k drsnosti povrchu referenčního vzorku bez postřiku, jelikož jak je vidět na obr. 3.10 – 3.12, každý postřik reaguje se substrátem jinak. Referenční vzorek měl průměrnou drsnost povrchu $R_z = 43,5 \mu\text{m}$. Nejvíce se drsnosti referenčního vzorku přiblížily postřiky A a C, které dobře vyplňovaly „propadliny“ substrátu a kopírovali jeho povrch. Zároveň je nutné zmínit, že před nanesením ochranných postřiků byly jako jediné substráty postřiku A navíc očištěny suchým ledem. Tato skutečnost by tak mohla mít vliv na chování ochranných postřiků vůči substrátu. Oproti ostatním postřik B vytvářel shluky hmoty (viz obr. 3.11), které značně zvyšovali drsnost povrchu ochranného postřiku. Jak je možné vidět z tab. 3.3, postřik B dosahoval drsnosti povrchu až o 50% vyšší než referenční vzorek.

Hlavním cílem této práce bylo vypracovat metodiku hodnocení odolnosti ochranných postřiků vůči mechanickému opotřebení. Jako první byla zvolena **rotační tribologická metoda**, při níž se vzorek otáčí a zatěžující tělísko stojí. Pro větší přiblížení reálným podmínkám v nízkotlaké formě byla tribologická zkouška provedena za pokojové teploty a následně při 400 °C.

Na obr. 3.18 – 3.20 je možné vizuálně porovnat opotřebení jednotlivých postřiků v daných časových intervalech. Již po 5 minutách od začátku zkoušky je vidět značný rozdíl v opotřebení jednotlivých postřiků. Dle tohoto hodnocení se nejlépe jeví postřik A, který ani po 30 minutách nezanechává tolik opotřebovaného materiálu v okolí drážky jako postřiky B a C. Nicméně je nutné brát v úvahu rotační povahu zkoušky, kde působí odstředivá síla a unáší opotřebovaný materiál. Obecně z výsledků měření hloubky a šířky opotřebované drážky uvedených na obr. 3.22 a obr. 3.23 lze konstatovat, že čím dříve ochranný postřik povolí mechanickému

namáhání od zatěžující kuličky z Al_2O_3 , tím do větší hloubky se kulička dostane. Dle tohoto hodnocení vychází nejhůře postřík B, kde kulička vytvořila drážku o průměrné hloubce 35,2 μm . U vzorků postříků B se také vyskytuje velký rozdíl mezi hloubkami jednotlivých vzorků, což může být způsobeno právě výše zmíněnými hromadícími se nánosy opotřebeného materiálu. Pro porovnání u postříků A a C se kulička dostala do hloubky 26,6 μm , resp. do 22,5 μm . Důkaz o největším opotřebením v postříku B udává tab. 3.8 a tab. 3.9, která popisuje zkoušku rotační tribologie při 400°C. Zde je vidět, že v postříku B vznikla drážka široká 1407,9 μm a hluboká 15 μm . Pro porovnání v postříku A vytvořila kulička drážku širokou 984,4 μm a hlubokou 11,1 μm . Při porovnání výsledků opotřebené drážky s opotřebením kuličky se objevily logické nesrovnalosti v opotřebením třecí dvojice. Dle zkušeností obsluhy tribometru by nejméně opotřebený postřík (postřík s nejmenší hloubkou a šířkou drážky) měl zanechat největší opotřebením protikusu – kuličky. Nicméně k tomuto jevu u měření při rotační zkoušce na tribometru nedošlo. Zároveň se tato zkouška projevila i jako velice časově náročná. Proto byl z výše uvedených důvodů v druhé fázi měření mechanického opotřebením využit lineární modul.

Dle výsledků měření hloubky a šířky po *lineární tribologii* za pokojové teploty na obr. 3.32 a 3.33 vychází postřík A jako nejodolnější proti mechanickému opotřebením. To dokazuje nejmenší vytvořená drážka, kterou během měření vytvořila zatěžující kulička. Na odolnost tohoto postříku také poukazuje nejmenší změna hloubky drážky během navyšujícího se počtu cyklů (750, 1500 a 3000 cyklů). Odolnost postříku A je potvrzena i výsledky z opotřebením protikusu na obr. 3.37, kde nejméně odolávala kulička v kontaktu s tímto postříkem a dosáhla tak největšího opotřebením. Zároveň je z tohoto grafu vidět, že opotřebením kuličky se s narůstajícím počtem cyklů mění značně rychleji než u postříků B a C, což vypovídá o vyšší odolnosti postříku A. Z obr. 3.34 - 3.36 je při sledování snímků kuličky při 750 cyklech vidět, že postřík A vytváří kolem kuličky nejméně nánosů, čehož si bylo možné povšimnout již u experimentu rotační tribologie na obr. 3.18 – 3.20.

Lepší odolnost postříku A v porovnání s ostatními postříky se zachovala i za zvýšených teplot při 400 °C. Tendence změny hloubky a šířky opotřebením u postříku A již zůstává na podobné hodnotě jako u ostatních postříků, nicméně hodnoty hloubky a šířky drážky jsou stále zhruba o 50% nižší jak u postříku B a C (viz 3.39 a 3.40). Toto tvrzení

podporují i grafy na obr. 3.38, kde byl sledován moment, kdy dojde k prodření ochranného postříku. V porovnání s postříky B (25 cyklů) a C (46 cyklů) vydržel postřík A zátěž 144 cyklů. Obr. 3.44, který popisuje opotřebení protikusu, poukazuje na nejvyšší opotřebení u postříku A. Anomálie v chování je zřetelná u postříku C, kde se při 1500 cyklech výrazně zvýšilo opotřebení kuličky. Pro zjištění příčiny této anomálie by však bylo nutné provést více měření.

Dle výsledků experimentu zkoušení a hodnocení trvanlivosti ochranného postříku líce formy lze pro budoucí zkoušky doporučit tribologickou metodu s lineárním modulem. Tato zkouška byla méně časově náročná. Vhodnost metody potvrzuje i soulad výsledů třecí dvojice, kdy byla splněna logická návaznost většího opotřebení zatěžující kuličky vůči odolnějšímu postříku. Při zachování postupu experimentu lze tuto metodu doporučit jako základ pro hodnocení odolnosti ochranného postříku líce formy mechanickému poškození.

5. Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout metodiku zkoušení a hodnocení odolnosti ochranného postřiku líce formy mechanickému poškození během procesu nízkotlakého lití. Tato diplomová práce se skládá ze dvou hlavních částí, teoretické a experimentální.

V teoretické části byla popsána technologie nízkotlakého lití. Dále zde byly popsány formy pro nízkotlaké lití, jejich konstrukce a životnost.. Hlavní pozornost byla věnována samotným ochranným postřikům, jejich technologii přípravy, životnosti a metodám hodnocení vlastností těchto postřiků.

Experimentální část byla zaměřena na zkoušení a hodnocení trvanlivosti ochranných postřiků pro nízkotlaké formy. Hodnotit odolnost ochranného postřiku přímo na nízkotlaké formě by bylo vzhledem k velikosti jednotlivých částí formy poněkud komplikované, proto byl v rámci spolupráce s firmou RONAL CR s.r.o. navržen přípravek pro výrobu zkušebních vzorků. Ve snaze o co největší přiblížení reálným podmínkám byly materiál, příprava povrchu vzorku a podmínky aplikace ochranného postřiku provedeny ve shodě s podmínkami průmyslové výroby. Zkoušky a hodnocení ochranných postřiků byly provedeny na třech šaržích vzorků s ochrannými postřiky A, B a C. Hodnoceno bylo chemické složení jednotlivých postřiků, tloušťka postřiku a drsnost povrchu postřiku. Měření mechanického opotřebení ochranného postřiku bylo realizováno dvěma metodami s cílem najít tu nejlepší metodiku hodnocení odolnosti ochranného postřiku. Pro co největší přiblížení reálným podmínkám ve formě byly tyto metody provedeny za pokojové teploty a při 400 °C. Následně byla navržená metodika použita pro vyhodnocení nejodolnějšího ochranného postřiku.

Na základě provedené rešerše a výsledků experimentu, které jsem získal během zpracování této diplomové práce, lze formulovat tyto závěry:

1. Líce kovové formy pro nízkotlaké lití je nutné chránit separačním postřikem zejména kvůli ochraně tvaru kovové formy před erozivními účinky proudícího tekutého kovu a vytvoření ochranné bariery bránící nalepení taveniny na líc formy. Odolný ochranný postřik zvyšuje životnost formy, snižuje investice do údržby formy a zlepšuje povrchovou kvalitu odlitků i jejich odformování.

2. Během procesu lití dochází vlivem tuhnutí odlitku a jeho vyjímání z formy k mechanickému odírání separátoru.
3. Dle výsledků chemické analýzy jednotlivých ochranných postřiků a provedených tribologických zkoušek je chemické složení postřiků přímo provázáno s odolností proti opotřebení. Zejména vzorky s obsahem nitridu bóru vynikaly lepším chováním vůči mechanickému opotřebení.
4. V praxi běžně využívaná metoda měření tloušťky postřiků nedestruktivním magneticko-indukčním způsobem neposkytuje dostatek informací o vrstvě postřiku. Při absenci vzhledu vrstvy postřiku v řezu chybí informace o celistvosti, homogenitě vrstvy a ukládání částic v ploše. Tyto informace se při porovnání s výsledky z tribologických zkoušek ukazují jako zásadní pro správné vyhodnocení odolnosti postřiku proti mechanickému opotřebení.
5. Měření drsnosti povrchu v kombinaci se snímkou z metalografického výbrusu vypovídá o tvaru a velikost zrn prvků v postřiku. Zároveň je drsnost postřiku provázána s drsností substrátu a je tedy nutné dbát na dokonalou přípravu povrchu formy před nanesením ochranného postřiku. Zejména vzorky ošetřené suchým ledem vykazovaly lepší odolnost vůči mechanickému opotřebení.
6. Z výsledků provedených tribologických zkoušek se jeví jako vyhovující pro metodiku hodnocení odolnosti ochranného postřiku proti mechanickému opotřebení tribologická zkouška s lineárním modulem. Tato zkouška rozšířená o zatížení při 400 °C podává relevantnější data než experiment rotační tribologie. Zkouška s lineárním modulem byla méně časově náročná a potvrdila soulad výsledů třecí dvojice, kdy byla splněna logická návaznost většího opotřebení zatěžující kuličky vůči odolnějšímu postřiku.
7. Z výsledků všech variant tribologických měření lze konstatovat, že čím dříve ochranný postřik povolí mechanickému namáhání od zatěžující kuličky z Al_2O_3 , tím do větší hloubky se kulička dostane. Dle výsledků z tribologického experimentu na lineárním modulu v kombinaci s výsledky měření drsnosti a snímky metalografických výbrusů lze považovat jako nejodolnější proti mechanickému opotřebení postřik A.

8. Pro další výzkum by bylo vhodně rozšířit tribologickou zkoušku s lineárním modulem o experimenty s více vzorky a získat tak větší soubor dat, který poskytne více informací o odolnosti ochranných postřiků.

Použitá literatura

- [1] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [3] BROWN, John R. *Foseco non-ferrous foundryman's handbook*. 11th ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1999. ISBN 0750642866.
- [4] Counter Pressure Die Casting. *Metal Technology group* [online]. Sofia, Bulharsko [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: https://mtgbg.com/uploads/documents/page/2/Counter_pressure_die_casting.pdf
- [5] Low Pressure Die Casting Process. *Quora* [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-223fea70beecb6ed82f44e9e90725778>
- [6] MACHUTA, Jiří a Iva NOVÁ. *Slévárenské formy*. V Liberci: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-083-5.
- [7] *INSURAL brochure* [online]. Drayton Manor Business Park, England: Foseco International Limited, 2015 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/international/foundry/non-ferrous-foundry/crucibles-refractories-and-ceramics.html>
- [8] ŠUSTR, Jindřich. Formy pro tlakové lití. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2005, roč. 53, č. 2-3, s. 90-91.
- [9] NE- Guss: Animation der Formöffnungssequenz [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://vimeo.com/413567638>
- [10] JUNG HOON LEE, Rafael. *Effect of Cooling Circuits Duration on Formation of Solidification Shrinkage in A356 Casting Automotive Wheels*. Auckland, 2006. Diplomová práce. Auckland University of Technology.
- [11] KRŇÁVEK, Václav a František STŘÍTECKÝ. Konstrukce forem pro odlitky lité pod tlakem a její vliv na výskyt vad. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2007, roč. 55, č. 2-3, s. 81-86.

- [12] MUHIČ, M., J. TUŠEK, D. KLOBČAR a M. PLETERSKI. Thermal fatigue cracking of die-casting dies. *Metalurgija* [online]. 2010, [cit. 2020-02-23]. ISSN 0543-5846. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/26843741_Thermal_fatigue_cracking_of_Die-casting_dies
- [13] Uddeholm [online]. Sweden, 2016 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: http://www.uddeholm.com/files/AB_die_casting_eng.pdf
- [14] ANDRESEN, Bill. *Die casting engineering: a hydraulic, thermal, and mechanical process*. New York: Marcel Dekker, 2005. ISBN 0-8247-5935-4.
- [15] SCHWAM, David Schwam. *Improved Die Casting Process to Preserve the Life of the Inserts* [online]. Cleveland, OH 44106, 2012 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1057028>
- [16] LICHÝ, Petr a Tomáš ELBEL. *STUDIJNÍ OPORA: Speciální metody výroby odlitků* [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Opory_FMM.
- [17] SIRŮČEK, Jan. Osobní konzultace
- [18] SUI, Dashan, Zhenshan CUI, Rong WANG, Shengfei HAO a Qingyou HAN. Effect of Cooling Process on Porosity in the Aluminum Alloy Automotive Wheel During Low-Pressure Die Casting. *International Journal of Metalcasting* [online]. 2016, [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40962-015-0008-0>
- [19] HORKÝ, Karel a Milan LUŇÁK. Zkušenosti se separačními postřiky kovových forem pro slitiny AlSi. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2018, roč. 66, č. 3-4, s. 114-118.
- [20] ENGELHORN, Günter. Automatizovaný postřik forem. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2008, roč. 56, č. 3-4, s. 147-148.
- [21] RAMPI, Giovanni. Release agents for die casting: general aspects and state on the art. *Edimet* [online]. 2005 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.hillandgriffith.com/die-casting-news/release-agents-for-die-casting>

- [22] NATESH, G. Lubricants in Die Casting. *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Berlin, Heidelberg. Springer, 2014. ISBN 978-3-642-22646-5.
- [23] *DYCOTE brochure* [online]. Drayton Manor Business Park, England: Foseco International Limited, 2015 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/non-ferrous-foundry/die-dressings-coatings/brochures/DYCOTE_e.pdf.downloadasset.pdf
- [24] MTeZ s.r.o.: Odvzdušňovací sítko [online]. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: www.mtez.cz/sitka
- [25] SEDLÁČEK, V. *Povrchy a povlaky kovů*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-01-00799-5.
- [26] AXÉN, Nilas, Sture HOGMARK a Staffan JACOBSON. *Friction and Wear Measurement Techniques*. [online]. [cit. 2020-05-10] Dostupné z: http://home.ufam.edu.br/berti/nanomateriais/8403_PDF_CH13.pdf
- [27] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1 vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 978-80-7043-668-1.
- [28] User Manual Tribometer TRB
- [29] Měření tloušťky povlaků. *TECHNOTEST s.r.o.* [online]. Blansko [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: http://www.technotest.cz/mereni_tloustky_povlaku

Přílohy

Příloha č.1 – Tloušťka postříků měřena magneticko – indukční metodou

Příloha č.2 – Opotřebení kuličky při rotační tribologii, $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

Příloha č.3 – Šířka opotřebené drážky při lineární tribologii, $T = 22^{\circ}\text{C}$

Příloha č.4 - Hloubka opotřebené drážky při lineární tribologii, $T = 22^{\circ}\text{C}$

Příloha č.5 – Opotřebení kuličky při lineární tribologii, $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

Příloha č.6 – Šířka opotřebené drážky při lineární tribologii, $T = 400^{\circ}\text{C}$

Příloha č.7 - Hloubka opotřebené drážky při lineární tribologii, $T = 400^{\circ}\text{C}$

Příloha č.8 - Opotřebení kuličky při lineární tribologii, $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Přílohy

Příloha č.1 – Tloušťka postřiků měřena magneticko – indukční metodou [μm]

postřik A								
vz. 1	vz. 2	vz. 3	vz. 4	vz. 5	vz. 6	vz. 7	vz. 8	vz. 9
20	22	28	21	18	21	21	20	21
postřik B								
vz. 10		vz. 11		vz. 12		vz. 13		vz. 14
28		36		24		22		24
postřik C								
vz. 15		vz. 16		vz. 20		vz. 18		vz. 19
27		27		18		23		22

Příloha č.2 – Opotřebení kuličky při rotační tribologii, $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

	vzorek 4	vzorek 6	vzorek 7	vzorek 10	vzorek 12	vzorek 14	vzorek 15	vzorek 16	vzorek 18
parametr A [mm]	0,443	0,529	0,483	0,615	0,593	0,654	0,597	0,520	0,537
parametr B [mm]	0,996	0,933	0,938	1,160	1,103	1,227	1,109	1,046	1,052
průměr kuličky [mm]	6	6	6	6	6	6	6	6	6
opotřebení V_{pin} [mm^3]	0,0014	0,0023	0,0017	0,0044	0,0038	0,0056	0,0039	0,0024	0,0027
SMODCH šarže	0,00035			0,00077			0,00063		

Příloha č.3 – Šířka opotřebené drážky při lineární tribologii [mm], $T = 22^{\circ}\text{C}$

postřik A			postřik B			postřik C		
750 cyklů	1500 cyklů	3000 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů	3000 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů	3000 cyklů
0,78	0,943	0,937	1,093	1,226	1,263	1,21	1,185	1,318

Příloha č.4 - Hloubka opotřebené drážky při lineární tribologii [mm], T = 22°C

postřik A			postřik B			postřik C		
750 cyklů	1500 cyklů	3000 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů	3000 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů	3000 cyklů
0,015	0,018	0,021	0,027	0,038	0,047	0,034	0,042	0,058

Příloha č.5 – Opotřebení kuličky při lineární tribologii [mm³], T = 22 °C

postřik A			postřik B			postřik C		
750 cyklů	1500 cyklů	3000 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů	3000 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů	3000 cyklů
0,00072	0,00117	0,00220	0,00051	0,00083	0,00118	0,00015	0,00056	0,0009

Příloha č.6 - Šířka opotřebené drážky při lineární tribologii [mm], T = 400°C

postřik A		postřik B		postřik C	
750 cyklů	1500 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů
0,778	0,802	1,122	1,249	0,998	1,079

Příloha č.7 - Hloubka opotřebené drážky při lineární tribologii [mm], T = 400°C

postřik A		postřik B		postřik C	
750 cyklů	1500 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů
0,020	0,027	0,032	0,041	0,028	0,037

Příloha č.8 - Opotřebení kuličky při lineární tribologii [mm³], T = 400 °C

postřik A		postřik B		postřik C	
750 cyklů	1500 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů	750 cyklů	1500 cyklů
0,00369	0,00437	0,00184	0,00283	0,00390	0,00708